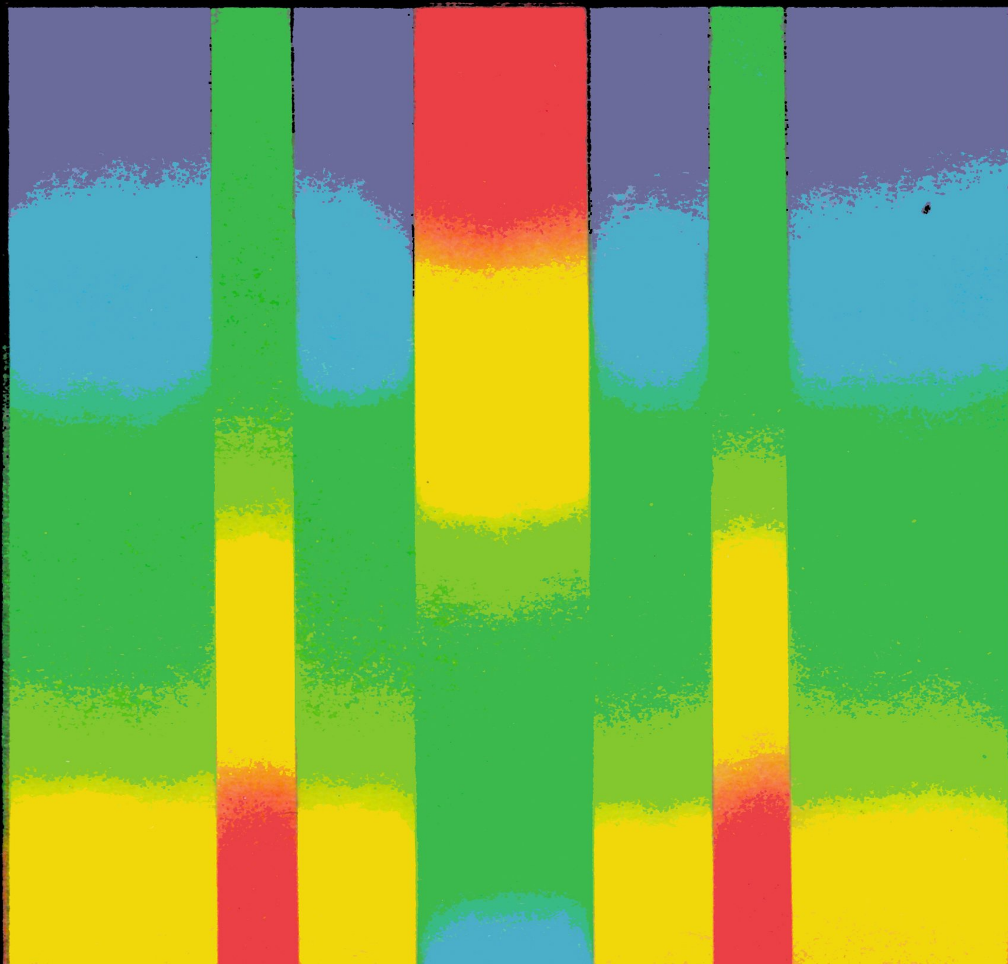
Vytautas Tarasonis

FIZIKA



Vytautas Tarasonis

FIZIKA

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos patvirtinta

Vadovėlis XI—XII klasei



VILNIUS MOKSLO IR ENCIKLOPEDIJŲ LEIDYKLA 1995

UDK 53(075.3)
Ta-129

Recenzavo

Vilniaus pedagoginio universiteto
Fizikos dėstymo metodikos katedra,
humanitarinių m. dr. *Z. Ramanauskas*

Mokslinis redaktorius
gamtos m. dr. *D. Grabauskas*

ISBN 5-420-00253-1

PRATARMĖ

Daug dešimtmečių Lietuvos vaikai visose vidurinėse ir aukštesniosiose mokyklose mokėsi fizikos vien iš verstinių vadovėlių. Todėl šis fizikos vadovėlis, parašytas turinčio didžiulę darbo patirtį pedagogo Vytauto Tarasonio,— neeilinis įvykis pedagoginės literatūros leidyboje.

Neeilinis šis vadovėlis ir savo išvaizda: gausiai iliustruotas, daugiaspalvis. Gerai apgalvoti, vaizdūs piešiniai, schemos, grafikai padeda greitai suvokti aiškinamąjį dalyką, atstoja ilgus žodinius aiškinimus. Kita vadovėlio ypatybė — tai autoriaus pastangos sudominti moksleivius fizika. Čia pateikiama daug faktų, pavyzdžių, palyginimų, paprastai priskiriamų įdomiajai fizikai. Su ja asocijuojasi ir epigramos, nestandartiškos antraštėlės, gyva kalba. Pateikiama daug klausimų ir uždavinių: dalis jų skiriama spręsti savarankiškai klasėje arba namuose. Vadovėlio prieduose pateikiami reikalingi žinyniniai duomenys. Beje, skatinti mąstymą, analizuoti padeda savo išmonėmis ir „Simas Klaidelė“, jau pažįstamas moksleiviams iš to paties autoriaus knygelės „Fizikos laboratoriniai darbai technikumams“. Be to, vadovėlyje pateikiama žinių apie fizikos mokslo ir mokymo istoriją Lietuvoje, dabar vykdomus fizikos tyrimus respublikos mokslo įstaigose.

Vadovėlio turinį sudaro šios dalys: „Molekulinė fizika ir šiluma“, „Elektra“, „Elektromagnetizmas“, „Optika“, „Reliatyvumo teorija“, „Atomo branduolio fizika“, „Astrofizikos pradmenys“. Svarbiausi mechanikos klausimai čia tik trumpai pakartojami.

Naujasis fizikos vadovėlis buvo rašomas moksleiviams, baigusiems 9 vidurinės mokyklos klases. Tačiau jo skaitytojų ratas kur kas platesnis, pirma, jis geriau už esamus bendrojo lavinimo mokyklų vadovėlius tinka visoms technikos mokykloms. Antra, tai tikrai vertinga priemonė visų mokyklų fizikos mokytojams, kurioje jie ras medžiagos pamokoms pagyvinti, iliustruoti. Praverstų jis ir bendrojo lavinimo mokyklų moksleiviams, ypač tiems, kurie sunkiau suvokia abstrakčiai dėstomą fiziką. Pagaliau, ši spalvinga knyga gali būti populiarus fizikos kursas visiems ja besidomintiems.

Redaktorė

Rašydamas šią knygą, siekiau sudominti jaunąjį skaitytoją fizika, palankiai nuteikti mokymuisi, ieškojau racionalaus vidurio tarp akademinės ir populiariosios fizikos. Specialiai pabrėžiau tas vietas, kur fizikos žinios ribojasi su nežinia, dar neišspręstomis problemomis. Esu įsitikinęs, kad pažiūra į fiziką, kaip į nuolatos besivystantį mokslą, kurio kelyje gausu ir nesėkmių, ir didelių laimėjimų, skatina kūrybinį mąstymą.

Dėkoju knygos recenzentams dėst. R. Gargasui, doc. S. Vaičiūnui, gerb. Z. Ramanauskui, moksliniam redaktoriui doc. D. Grabauskui ir „Mokslo“ leidyklos redaktorei E. Juškienei už didelį ir nuoširdų darbą tobulinant šią knygą.

Autorius

KAS IR KAIP KNYGOJE PAŽYMĖTA

Ką, mokantis kiekvieną temą, būtina įsiminti, kurį uždavinį būtina išspręsti, rodo antraštėlių fono spalva, skirtingas šriftas. Spalvomis ir specialiais sutartiniais ženkleliais nurodoma:

— esminiai teiginiai,

— kita privaloma medžiaga,

— papildoma medžiaga,

— privalomas klasės darbas,

— papildomas klasės darbas,

— privalomas namų darbas,

— papildomas namų darbas (labiau besidomintiems fizika),

? — klausimai,

 — Simo Klaidelės — aktyvaus, bet šiek tiek išsiblaškiusio moksleivio — „veikla“, kurioje reikia aptikti klaidas.

Jei mokotės iš šios knygos savarankiškai, būtinai atlikite nurodytuosius privalomus klasės ir namų darbus, nes jų rezultatai papildo dėstomą medžiagą, susieja atskirus klausimus.

Apibrėžimai, dėsnių formuluotės knygoje atspausdintos juodesniu šriftu, terminai ir kiti pabrėžiami žodžiai — pakrypusiu šriftu (kursyvu).

Knygos pabaigoje, „Priede“, pateiktos uždaviniams spręsti reikalingos fizikinių dydžių lentelės. Jos numeruotos romėniškais skaitmenimis; taigi I, II ir t. t. lentelių ieškokite „Priede“.

Pabaigoje rasite ir uždavinių atsakymus.

ĮVADAS

1 paskaita

FIZIKOS ŠAKNYS IR ŠAKOS

§ 1.1. Ką tiria fizika

Materija ir judėjimas

Visa, kas įvairiausiais pavidalais egzistuoja pasaulyje, visa, kas mus supa Žemėje ir už jos ribų — tai negyvoji ir gyvoji **gamta.** Fizika yra bendriausias mokslas apie negyvąją gamtą. Ja remiasi ir kiti gamtos mokslai — chemija, geologija, astronomija, fizinė geografija, meteorologija ir kt.

Gamta sudaryta iš **materijos.** Materija yra dvejopo pavidalo — **medžiagos** ir **lauko.** *Vieno pavidalo materija gali virsti kito pavidalo materija. Materija nuolat kinta.* Fizikoje bet koks materijos kitimas vadinamas **judėjimu.** Fizika nagrinėja pačias bendriausias materijos judėjimo formas: mechaninį, šiluminį, elektromagnetinį judėjimą, taip pat judėjimą atomo ir jo branduolio viduje. Taigi fizika tiria medžiagos ir lauko sandarą, savybes, nustato materijos judėjimo dėsnius.

Nuo stebėjimo iki dėsnio

Bet kurią tiriamą medžiagos dalį — ar tai būtų atomo dalelė, ar automobilis, ar Mėnulis — vadiname **fizikiniu kūnu.** Visus fizikinių kūnų, materijos kitimus vadiname **fizikiniais reiškiniais.**

Fizika tiria vykstančius gamtoje reiškinius — juos stebi, be to, dirbtinai sudaro sąlygas jiems pasireikšti — eksperimentuoja. Apibendrinus eksperimentų ir stebėjimų rezultatus, kuriamos **hipotezės,** t. y. nevisiškai įrodyti reiškinių, jų priežasčių aiškinimai. Gavus naujų duomenų hipotezė arba atmetama, arba patvirtinama; pastaruoju atveju ji virsta nauju **fizikos dėsniu** arba net nauja mokslo teorija.

Vieni fizikos dėsniai nusako griežtą kiekybinę priklausomybę ir išreiškiami formulėmis, kiti matematiškai nereiškiami. Dėsniai veikia nepriklausomai nuo žmonių valios, ir mokslo tikslas yra juos atskleisti bei panaudoti.

Suprantama, visų gamtos reiškinių negalima paaiškinti vien fizikos dėsniais, veikia ir chemijos, biologijos bei kitokie dėsniai, tačiau niekas nevyksta gamtoje kitaip nei nusako fizikos dėsniai. Tai rodo svarbią fizikos vietą tarp gamtos mokslų.

Fizikos medžio šakos

Visą fizikos mokslą patogu skirstyti į dalis atsižvelgiant į materijos judėjimo formas: mechaninį, šiluminį ir kt. Taigi šešios stambiosios „fizikos medžio" šakos yra **mechanika, šiluminė fizika, elektrodinamika, optika** ir **atomo** bei **atomo branduolio fizika.** Kiekviena fizikos dalis skirstoma į dar smulkesnes (žr. turinį).

Su kiekviena fizikos dalimi jau esate daugiau ar mažiau susipažinę mokykloje. Šiame fizikos kurse tos žinios išplečiamos ir pagilinamos, kai kurie teiginiai įrodomi matematiškai, mokoma taikyti fizikos žinias praktikoje. Pavyzdžiui, jau žinote, kad kūnai šildami plečiasi, o aušdami traukiasi. Tačiau praktiškai labai svarbu apskaičiuoti, kiek gi pasikeis kūno ilgis ar tūris pakitus temperatūrai. Atlikti daug tokių skaičiavimų išmoksite studijuodami šį fizikos kursą. Diena iš dienos kopsite į „fizikos medį", kol iš viršūnės atsivers platus ir aiškus pasaulio vaizdas.

§ 1.2. Fizikos raida

Keturi fizikos amžiai

Gamtos reiškinius žmonės stebėjo ir bandė aiškinti nuo giliausios senovės. Nemažai fizikos žinių randame graikų filosofų, gyvenusių keli šimtmečiai prieš mūsų erą, veikaluose. Įžymusis graikų mokslininkas Aristotelis (384—322 m. pr. m. e.) pirmasis pavartojo žodį **fizika** (gr. *physis* — gamta).

Jau senų senovėje žmonės darė sudėtingas karo priemones, statė piramides ir kitus didžiulius statinius, tiltus, įtvirtinimus. Senovės meistrų sugebėjimai ir fizikos išmanymas stebina ir šiandien. Daugelis senųjų statinių statybos ir akustikos paslapčių dar neatskleista.

Pirmuosius mechanikos, hidrostatikos ir optikos dėsnius atrado Archimedas ir Heronas dar III a. pr. m. e.

Viduramžiais, įsigalėjus Europoje teologijai ir scholastikai, mokslai sunyko. Jie vėl atgijo stojus renesansui. Plėtojosi jūreivystė, tobulėjo technika, todėl vis daugiau reikėjo fizikos žinių. XVII a. fizika tapo savarankišku mokslu. Pradėjo kurtis mokslo įstaigos, universitetai, pasaulyje nuskambėjo Galilėjaus ir Niutono vardai. XVII—XVIII a. buvo pradėti elektrostatikos, optikos, akustikos tyrimai, bet iš esmės tai buvo **mechanikos amžius.**

XVIII ir XIX a. sandūroje atsirado ir tobulėjo garo mašinos, išrastas termometras, manometras, buvo kaupiamos šiluminės fizikos žinios. Garo mašinos įsigalėjo gamyboje ir transporte. Šiuo laikotarpiu padaryta daug svarbių atradimų ir kitose fizikos šakose. Vis dėlto XIX a. teisėtai vadinamas **garo amžiumi,** taigi ir „šiluminės fizikos amžiumi“.

Faradėjui atradus elektromagnetinės indukcijos reiškinį, XIX a. pabaigoje ir XX a. pradžioje sparčiai vystėsi elektrotechnika. Atsirado ir tobulėjo elektros mašinos, vis plačiau imta naudoti elektros energiją technikoje ir buityje. Tas laikotarpis vadinamas **elektros amžiumi.**

XX a. fizika pradėjo skverbtis į atomų ir jų branduolių sandaros paslaptis. Mokslininkai išmoko panaudoti atominę energiją — 1954 m. pradėjo veikti pirmoji pasaulyje atominė elektrinė, pastatyta buvusioje Tarybų Sąjungoje. Šiandien įvairiose šalyse veikia šimtai atominių elektrinių. Viena galingiausių pasaulyje yra 2,5 mln kW galios Ignalinos atominė elektrinė (§ 65.3). Sparčiai plečiasi atominis jūrų transportas. Taigi dabartinį laikotarpį dera vadinti **atomo amžiumi.**

Nuo 1957 m., kai buvusioje SSRS buvo paleistas pirmasis dirbtinis Žemės palydovas, žmogus sparčiai skverbiasi į kosmoso erdves. 1961 m. Jurijus Gagarinas pirmą kartą apskriejo Žemės rutulį, o 1970 m. JAV kosmonautai jau aplankė Mėnulį.

Skriejant kosminiais laivais atliekami sudėtingi moksliniai tyrimai, laivai sujungiami, kuriamos kosminės stotys. Netoli tas laikas, kai kosmonautai pasieks artimiausias planetas. Taigi gyvename ir **kosmoso amžiuje.**

Kaip pavadinsime ateinančius amžius? Šiandien svarbiausios fizikos raidos kryptys yra gilinimasis į mikropasaulio struktūrą, valdomos termobranduolinės reakcijos — termobranduolinės energetikos — kūrimo klausimai ir Visatos tyrimai.

Fizikos ir technikos ryšys

Fizikos ir technikos istorija akivaizdžiai rodo, kad žmogui reikalingų gėrybių gamybos būdai priklauso nuo turimų fizikos žinių. Pritaikant fizikos atradimus atsiranda ir plėtojasi naujos technikos šakos, kuriami tobulesni įrengimai ir aparatai, efektyvesni gamybos būdai.

Savo ruožtu technika skatina fizikos pažangą. Ji — pagrindinis fizikos „užsa-

kovas“. Technika kelia naujus uždavinius fizikai ir gamina eksperimentinėms laboratorijoms vis tobulesnius ir tikslesnius prietaisus. Tokio bendradarbiavimo rezultatai akivaizdūs. Dabar mokslo atradimai panaudojami praktikoje daug greičiau negu, sakysime, praeitame šimtmetyje. Pavyzdžiui, fotografijos idėja buvo įgyvendinta po 112 metų, telefono — 56, radijo — 35, televizijos — 12, atominės energetikos — 6, tranzistoriaus — 5, lazerio — 2 metų.

Šiuolaikiniams gamybos procesams suprasti ir vykdyti reikalingos fizikos žinios, todėl jas privalo įsigyti bet kurio profilio technikas.

§ 1.3. Fizika Lietuvoje

Alma mater Vilnensis

Fizikos mokslas Lietuvoje turi senas ir garbingas šimtmečių tradicijas. Lietuvos Didžiojoje Kunigaikštystėje fizika, tada vadinta *gamtos filosofija*, jau dėstyta 1579 m. įkurtame Vilniaus universitete. Tai vienas seniausių universitetų Europoje.

Fizikos srityje dirbo daugelis žinomų Vilniaus universiteto profesorių: Osvaldas K r y g e r i s (1598—1665), Tomas Ž e b r a u s k a s (1714—1758), Juozapas M i c k e v i č i u s (1743—1817), Steponas S t u b e l e v i č i u s (1762—1814) ir kiti. Vilniaus universiteto mokslininkai keliaudavo tobulintis į Prancūzijos, Italijos, Vokietijos ir kitų šalių aukštąsias mokyklas. Remdamiesi naujausiais Vakarų Europos mokslų laimėjimais, jie kūrė pažangias fizikos dėstymo Lietuvoje tradicijas, dirbo mokslo tiriamąjį darbą. Mokslo lygiu Vilniaus universitetas neatsiliko nuo daugelio Europos universitetų. 1753 m. Vilniaus universitete buvo atidaryta viena pirmųjų Europoje moderni astronomijos observatorija.



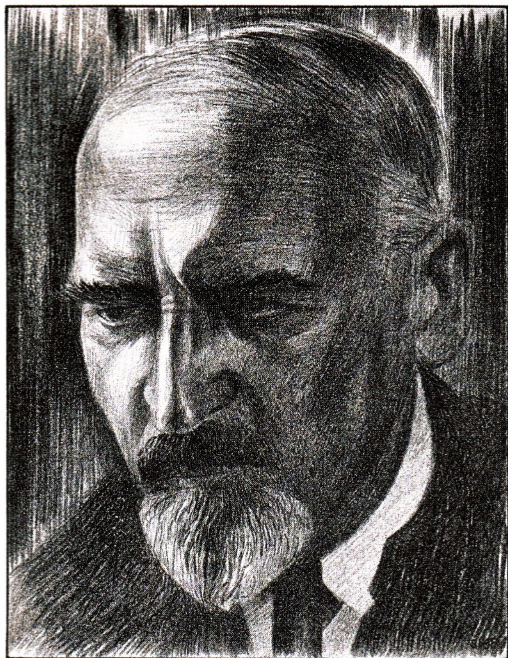
Tomas Žebrauskas (1714—1758)

Vilniaus universitetas turėjo didelės įtakos Rytų Europos kultūrai.

Tamsi carizmo priespauda

1830—1831 m. sukilime dalyvavo apie 400 universiteto studentų ir darbuotojų, todėl, nuslopinusi sukilimą, caro valdžia 1832 m. universitetą uždarė, o biblioteką, mokymo priemones ir kitą turtą perdavė naujai kuriamam Kijevo universitetui. Tai buvo skaudus smūgis krašto kultūriniam gyvenimui, kartu ir fizikos mokslui. Beveik šimtą metų aukštosios mokyklos Lietuvoje nebuvo.

Po 1863 m. sukilimo caro valdžia uždraudė spausdinti lietuviškas knygas. Tai dar smarkiau pristabdė kultūros raidą Lietuvoje.



Vincas Čepinskis (1871—1940)



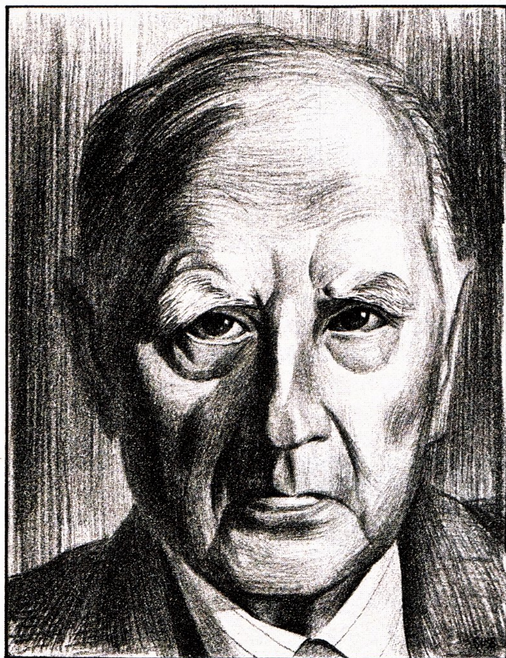
Adolfas Jucys (1904—1974)

Fizikos atgimimo pradininkai

Spaudos draudimas buvo panaikintas 1904 m., o 1905 m. jau pasirodė pirmasis lietuviškas Petro Vileišio fizikos vadovėlis „Populiariškas rankvedis fyzikos“.

Fizikos mokslas Lietuvoje vėl atgimė 1919 m. pabaigoje atidarius Kaune Aukštuosius kursus; šių kursų pagrindu 1922 m. vasario 16 d. Lietuvos vyriausybė įkūrė Lietuvos universitetą. 1930 m. Lietuvos universitetas pavadintas Vytauto Didžiojo universitetu. Fizikos katedros įkūrėjas ir pirmasis jos vadovas buvo profesorius Vincas Čepinskis (1871—1940). V. Čepinskis parašė ir pirmuosius lietuviškus fizikos vadovėlius universiteto studentams „Fizikos paskaitos“. Jo rūpesčiu Kaune buvo pastatytas fizikos ir chemijos institutas.

Pirmieji fizikos dėstytojai Lietuvos universitete buvo užsienyje baigę mokslus profesoriai Kęstutis Šliūpas (1888—1932), Ignas Končius (1886—1975) ir Kazimieras Sleževičius (1890—1953). Jie išugdė nors ir negausią, tačiau darbščią ir talentingą Lietuvos fizikų kartą. Daugelis jų vėliau tapo žymiais mokslininkais: tai akademikai Adolfas Jucys (1904—1974), Povilas Brazdžiūnas (1897—1986), Kazimieras Baršauskas (1904—1964), Paulius Slavėnas (1901—1991), Jurgis Viščakas (1927—1990), profesoriai Antanas Žvironas (1899—1954), Antanas Puodžiukynas (1898—1987) ir kiti.



Povilas Brazdžiūnas (1897—1986)

Fizikos mokslo suklestėjimas

Per paskutiniuosius keturis dešimtmečius fizikos mokslas Lietuvoje sparčiai plėtėsi. Įkurti nauji mokslo centrai: Fizikos institutas (1956 m.), Elektrografijos institutas (1957 m.), Puslaidininkių fizikos institutas (1967 m.), Fizikinių ir techninių energetikos problemų institutas (1967 m.), Teorinės fizikos ir astrofizikos institutas (1990 m.). Išaugo Vilniaus universiteto fizikos fakultetas. Fizikos fakultetai arba katedros yra beveik visose Lietuvos aukštosiose mokyklose. Svarbūs tyrimai atliekami aukštųjų mokyklų probleminėse laboratorijose — lazerių fizikos Vilniaus universitete, ultragarso Kauno technologijos universitete ir kitose.

Mokslo daktarų Stepono Ašmonto, Konstantino Repšo ir akademiko Juro Poželos pastebėtas ir ištirtas naujas reiškinys puslaidininkiuose 1977 m. pripažintas **moksliniu atradimu.** Tai pirmas ir kol kas vienintelis atradimas Lietuvos mokslo istorijoje.

Plačiai žinomi Lietuvos fizikų ir astrofizikų Vytauto Straižio, Kazimiero Pyrago, Antano Bandzaičio, Zenono Rudziko, Juozo Vaitkaus, Algio Piskarsko ir daugelio kitų darbai.

?

1. Pateikite tris fizikinių reiškinių pavyzdžius.
2. Pateikite fizikos dėsnių, turinčių matematinę išraišką arba jos neturinčių, pavyzdžių.
3. Į kokius skyrius skirstoma fizikos dalis optika?
4. Pateikite pavyzdžių, patvirtinančių teiginį, kad technika aprūpina fizikos mokslininkus vis tobulesniais ir tikslesniais prietaisais.
5. Koks, jūsų nuomone, fizikos „amžius" bus po „atomo amžiaus"?
6. Gal žinote, kurie žymūs Lietuvos fizikai yra kilę iš Jūsų miesto, krašto?

---

2 paskaita

TARPTAUTINĖ FIZIKOS KALBA IR RAŠTAS

„Jeigu savo žinias apie kokį nors daiktą galite išreikšti skaičiumi, tai apie tą daiktą jau šį tą žinote."

V. Tomsonas

§ 2.1. Fizikiniai dydžiai

Nuo ko pradėti?

Tą patį gamtos reiškinį vienaip aprašo poetai, kitaip agronomai, dar kitaip fizikai — kiekvienas įžvelgia vis kitas jam svarbias savybes.

Fizikoje, tiriant kokį nors naują reiš-

kinį ar objektą, pirmiausia nustatomi jo savybes apibūdinantys **fizikiniai dydžiai,** arba **parametrai.** Kiekvienas fizikinis dydis apibūdina objektą ne vien *kokybiškai*, bet ir *kiekybiškai*. Taigi fizikinis dydis turi būti *matuojamas*. Pavyzdžiui, knygos savybės: graži, įdomi yra ne fizikinės, nes jų neįmanoma išmatuoti, o kieta, mėlyna, šilta — jau fizikinės savybės. Išmatuoti fizikinį dydį — reiškia palyginti jį su kitu tos pačios rūšies dydžiu, kuris laikomas **matavimo vienetu.** Toks matavimas, kai fizikinis dydis tiesiogiai lyginamas su pasirinktu vienetu, vadinamas **tiesioginiu matavimu.** Tačiau dažnai fizikinio dydžio skaitinė vertė apskaičiuojama naudojantis formule, išmatavus kitus toje formulėje esančius dydžius. Tuomet sakome, kad matavimas yra **netiesioginis.** Pavyzdžiui, tiesiogiai išmatavę monetos masę ir tūrį, galime, naudojantis formule $\varrho = \frac{m}{V}$, sužinoti monetos tankį.

Skaliariniai ir vektoriniai dydžiai

Fizikiniai dydžiai, kurie apibūdinami tik skaitine verte (ji gali būti ir teigiamas, ir neigiamas skaičius), vadinami **skaliariniais dydžiais,** arba tiesiog **skaliarais.** Laikas, tūris, masė, temperatūra, energija ir t. t. yra skaliariniai dydžiai.

Fizikiniai dydžiai, kuriuos apibūdinant reikia nurodyti ne tik skaitinę vertę, bet ir kryptį, vadinami **vektoriniais dydžiais,** arba tiesiog **vektoriais.** Greitis, pagreitis, jėga yra vektoriai.

Vektoriniai dydžiai grafiškai vaizduojami atkarpomis su rodyklėmis. Atkarpos ilgis rodo sutartu masteliu dydžio vertę. Vektoriniai dydžiai rašomi pastorintu šriftu (**a**, **v**, **F**) arba su rodykliukėmis virš žymens ($\vec{a}$, $\vec{v}$, $\vec{F}$). Vektorinio dydžio skaitinė vertė vadinama jo **moduliu** (žymima *a*, *v*, *F*). Nagrinėjant tokius reiškinius, kur vektorinių dydžių kryptys nevaidina vaidmens, operuojama vektorių moduliais.

§ 2.2. Formulės ir grafikai fizikoje

Ar pakanka įsiminti formules?

Fizikoje naudojama viso pasaulio fizikams suprantama simbolių, formulių ir grafikų kalba. Kaip perskaičius gramatikos simboliais — raidėmis — užrašytą žodį „knyga“ (nieko panašaus neturinčio į knygą), mūsų sąmonėje iškyla jos vaizdinys, arba kaip įgudęs muzikantas, žiūrėdamas į natomis išmargintą lapą, girdi melodiją, taip turime išmokti suvokti fizikos formulėje tą realybę, kurią ji aprašo. Tik tada fizikos formulės iš atminties balasto virs fizikinio mąstymo priemonėmis.

Fizikos ir matematikos formulės

Matematikos formulėje visiškai nesvarbu, kas yra, sakysime, *a* ir kas *b*: ryšys $(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$ visuomet teisingas, kad ir kokie skaičiai tie *a* ir *b* būtų. Fizikoje kiekviena formulė yra prasminga tik tada, kai į ją įeinantys dydžiai turi konkrečią prasmę. Pavyzdžiui, matematinė formulė $y = \frac{ab^2}{c}$ fizikoje gali aprašyti visiškai skirtingus reiškinius: jeigu *a* bus pagreitis, *b* — judėjimo laikas (t), o $c = 2$, tai *y* apibūdins nueitą kelią ($s = \frac{at^2}{2}$); jeigu *a* bus kūno masė (m), *b* — jo greitis (v), o $c = 2$, tai *y* bus to kūno kinetinė energija ($E = \frac{mv^2}{2}$); o jeigu, likus tai pačiai *a* ir *b* prasmei, *c* reikš apskritimo spindulį *r*, tai *y* jau bus kūną veikianti įcentrinė jėga ($F = \frac{mv^2}{r}$).

Taigi fizikoje nėra abstrakčių formulių. Todėl būtina gerai suprasti formules sudarančių simbolių ir veiksmų su jais fizikinę prasmę.

Lentelės ir grafikai

Ryšys tarp fizikinių dydžių, dydžio kitimas gali būti parodomas lentele arba grafiku. Pavyzdžiui, praktiniams skaičiavimams

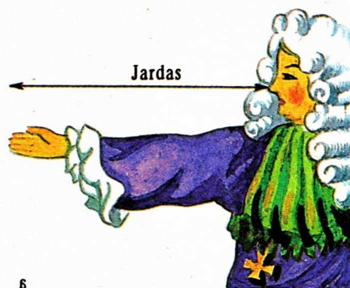
naudojamos medžiagos tankio, varžos įvairiose temperatūrose lentelės. Grafikai pateikia daugiau informacijos negu lentelės ir yra vaizdesni. Jie ypač svarbūs aprašant sudėtingus procesus, kurių neįmanoma arba labai sudėtinga aprašyti formulėmis. Atliekant bandymus šiuolaikinėse mokslinio tyrimo laboratorijose, dažnai grafikus automatiškai braižo matavimo prietaisai ir apdoroja skaičiavimo mašinos. Grafikas fizikui pasako ne mažiau negu ilgas proceso aprašymas. Pavyzdžiui, vandens tūrio kitimo, kintant temperatūrai, grafikas (žr. 18.4 pav.) rodo ir kada vanduo būna sunkiausias, kokioje temperatūroje jis virsta ledu, kaip tuomet išsiplečia ir kitką.

§ 2.3. Tarptautinė vienetų sistema SI

Truputis istorijos

Senovėje kiekviena šalis, net provincija ar didesnis miestas turėjo savus ilgio, ploto ir kitų dydžių matus. Pavyzdžiui, XII a. Anglijos karalius Henrikas I įsakė pagaminti ilgio matą pagal savo rankos ilgį — nuo didžiojo piršto iki nosies galo (2.1 pav., *a*). Taip atsirado jardas (0,914 m). 1760 jardų — angliška mylia (1609,3 m).

Lietuvoje, kaip ir kitose Europos šalyse, ilgį matuota coliais (25,4 mm) (2.1 pav., *b*); 12 colių — tai pėda (30,48 cm), (2.1 pav., *c*), $2\frac{1}{3}$ pėdos — aršinas (71,12 cm)



a



b



c



d



e

2.1 pav.

(2.1 pav., *d*), 3 aršinai arba 7 pėdos — sieksnis (213,36 cm) (2.1 pav., *e*). Įvairių būta ir tūrio, svorio bei ploto vienetų: kvortos, gorčiai, pūdai, svarai, valakai ir t. t. Tokia padėtis kėlė painiavą, trukdė ryšiams tarp valstybių, prekybai.

1799 m. prancūzų mokslininkai tiksliai apskaičiavo einančio per Paryžių Žemės meridiano ilgį ir pasiūlė įvesti naują ilgio vienetą, lygų vienai keturiasdešimtmilijonajai to meridiano daliai. Pavadino jį *metru* (gr. *metron* — matas). Drauge su metru atsirado gausus būrys jo „giminaičių“: kilometras, hektaras, litras, kilogramas ir kiti. Pirmą kartą istorijoje atsirado matai, sudarantys sklandžią sistemą. Tūrio vienetas litras yra 1 kubinis decimetras, o kilogramas — tai 1 litro gryno vandens masė. Vėliau kilogramas tapo nepriklausomas nuo metro, savarankiškas masės vienetas. Tai — masė kilogramo etalono, pagaminto iš platinos ir iridžio lydinio. Metro etalonas — iš to paties lydinio pagamintas X profilio strypas (metras — atstumas tarp įrėžtų ant etalono brūkšnelių).

1960 m. metras buvo susietas su dar tikslesniu etalonu, nekintamu bet kokiomis sąlygomis: juo buvo pasirinktos tam tikros šviesos bangos (§ 59.1).

Metrinė matų sistema palaipsniui įsigalėjo visame pasaulyje ir tapo fizikinių vienetų **tarptautinės sistemos** dalis.

Septyni pagrindiniai SI vienetai

Tarptautinę fizikinių vienetų sistemą, sutrumpintai vadinamą SI (Systeme Internationale), sudaro **pagrindiniai** — laisvai parinkti — vienetai ir iš jų išvesti, naudojant formules, **išvestiniai** vienetai.

Pagrindiniai SI vienetai yra šie:

ilgio vienetas **metras** (m) (§ 59.1),
masės vienetas **kilogramas** (kg),
laiko vienetas **sekundė** (s) (§ 59.1),
medžiagos kiekio vienetas **molis** (mol) (§ 6.2),
srovės stiprumo vienetas **amperas** (A) (§ 37.2),
šviesos stiprumo vienetas **kandela** (cd) (§ 49.2).

Kaip sudaromi išvestiniai vienetai

Septynių pagrindinių vienetų pakanka visų kitų fizikinių dydžių vienetams išreikšti. Išvestiniai vienetai sudaromi pagal tokias taisykles:

1. Užrašoma formulė, siejanti naują fizikinį dydį su kitais dydžiais, kurių vienetai jau žinomi (pvz., $F = ma$).
2. Vietoj fizikinių dydžių įrašomi žinomi jų vienetai ($F = 1\ \mathrm{kg} \cdot 1\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$).
3. Atliekami veiksmai ($F = 1 \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$).

Išvedėme jėgos vienetą $\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. Jis pavadintas niutonu (N). Devyniolika išvestinių vienetų pavadinti įžymių fizikų vardais. Kiti vienetai atskirų pavadinimų neturi, pavyzdžiui, greičio vienetas — $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ (skaitome: metras per sekundę), tankio vienetas — $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ (skaitome: kilogramas metrui kubu) ir t. t. Knygos gale pateikta SI vienetų lentelė (1 priedas).

Kaip spręsti uždavinius

Mokykloje *fizikos uždaviniai sprendžiami tik SI vienetais*. Tačiau technikoje, buityje vartojama daug nesisteminių vienetų: minutė, valanda, litras, kilometras, centneris, hektaras, arklio galia, kalorija, atmosfera ir kt. Sprendžiant uždavinius, duomenys iš pradžių surašomi tais vienetais, kurie pateikti uždavinio sąlygoje, o tada perskaičiuojami SI vienetais. Tai labai svarbus uždavinio sprendimo etapas. Būkite atidūs!

Sąlygos duomenis perskaičiavus vienos sistemos vienetais, skaičiuojant *nebūtina prie skaičių rašyti vienetų santrumpas* —

veiksmus galima atlikti tik su „grynais“ skaičiais. Vienetai būtinai rašomi tik prie tarpinių ir galutinio rezultatų. Jei visų žinomųjų dydžių reikšmės pateiktos SI vienetais, tai ir rezultatas savaime bus išreikštas atitinkamais SI vienetais.

Pavyzdys. Į kokį aukštį galima pakelti per minutę 400 m^3 vandens, jei siurblio naudinga galia $2{,}0 \cdot 10^3$ kW?

$V = 400\ m^3$,
$N = 2 \cdot 10^3\ kW = 2 \cdot 10^6\ W$,
$t = 1\ min = 60\ s$,
$\varrho_{v.} = 10^3 \frac{kg}{m^3}$; (I lent.)

---

h — ?

S p r e n d i m a s. Siurblio atliktas darbas lygus pakelto vandens potencinei energijai:

$A = E_p$.

Į šią lygybę įrašome darbo ir potencinės energijos formules: $A = Nt$; $E_p = mgh$; taigi

$Nt = mgh$.

Nežinomą vandens masę išreiškiame iš tankio formulės:

$\varrho = \frac{m}{V}$; $m = \varrho V$.

Gauname lygybę

$Nt = \varrho Vgh$.

Išreiškiame ieškomąjį dydį:

$h = \frac{Nt}{\varrho Vg}$.

Įrašome skaitines vertes ir apskaičiuojame:

$$h = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 60}{10^3 \cdot 400 \cdot 9{,}8}\ m = 30\ m.$$

Ats. $h = 30$ m.

2.1. Automobilis važiuoja horizontaliu keliu pastoviu 72 km/h greičiu, vystydamas 55 kW naudingą galią. Kokio didumo jėga priešinasi judėjimui?

2.2. Vertikaliai pakeliant masės $m = 2{,}0$ kg kūną į $h = 10$ m aukštį, atliekamas darbas $A = 240$ J. Su kokiu pagreičiu keliamas krovinys?

?

1. Kaip galima tiesioginiu būdu išmatuoti monetos tūrį?
2. Ar aukštis yra vektorinis, ar skaliarinis dydis?
3. 1 AG išreikškite SI vienetais.

2.3. Kokią naudingą galią vysto kranas, tolygiai užkeldamas 25 kN svorio krovinį į 15 m aukštį per 2,5 min?

2.4. Masės $m = 1200$ t traukinys važiuoja horizontaliais bėgiais pastoviu greičiu $v = 54$ km/h. Naudinga šilumvežio traukos galia $N_n = 882$ kW. Apskaičiuokite pasipriešinimo judėjimui koeficientą.

1 dalis

MOLEKULINĖ FIZIKA IR ŠILUMA

1.1 skyrius.

MEDŽIAGOS SANDARA

„Jeigu įvyktų pasaulio katastrofa, per kurią žūtų visos mokslo žinios, ir ateities kartoms būtų galima perduoti tik vieną trumpą sakinį, tai, mano nuomone, tas sakinys būtų šitoks: „Visos medžiagos sudarytos iš mažiausių dalelių — atomų, nuolatos judančių ir traukiančių arba stumiančių vienas kitą priklausomai nuo jų tarpusavio atstumo“. Šiame sakinyje sukauptas neįtikėtinas kiekis mokslinės informacijos apie pasaulį“.

R. Feinmanas,
Nobelio premijos laureatas

3 paskaita

VISKĄ LEMIA MOLEKULĖS

§ 3.1. Truputis istorijos

Ką tik pateiktame didžiausios mokslinės vertės sakinyje sutelkta **medžiagos sandaros molekulinės kinetinės teorijos** esmė. Tik ja remiantis galima paaiškinti kūnų sandarą ir daugybę gamtos reiškinių: kuo skiriasi geležies struktūra nuo oro ar vandens, kodėl nesikeičia temperatūra skystėjant ledui ar verdant vandeniui, kodėl dujos slegia, vyksta difuzija, kinta temperatūra, skysčiai verda ir garuoja, kūnai šildomi plečiasi ir daugybę kitų.

Dar 400 m. pr. m. e. senovės graikų filosofas Demokritas pareiškė mintį, kad medžiagos yra sudarytos iš smulkių dalelių, kurias jis pavadino atomais. Visų gamtos reiškinių pagrindu Demokritas pripažino atomus ir tuštumą. Demokrito atomai — tai nedalomos medžiagos dalelės, kurios skiriasi nuo kitos medžiagos dalelių savo forma, dydžiu ir judėjimu. Ir tik dėl to, kad neįmanoma jų įžiūrėti, kūnai atrodo vienalyčiai,— teigė Demokritas. Kūnų įvairovę Demokritas aiškino skirtingais atomų deriniais, o visus gamtoje vykstančius kitimus — įvairiais tuštumoje judančių atomų susijungimais ir atsiskyrimais. Tai buvo genialus spėjimas apie medžiagos sandarą, eksperimentais patvirtintas tik po dviejų su viršum tūkstančių metų.

Viduramžiais viešpatavęs Aristotelio mokymas kategoriškai neigė atomų buvimą. „Kiekvieną kūną galima dalyti ir dalyti be galo“,— mokė Aristotelis.

Nuo XVII a. prasidėjo molekulinės teorijos atgimimas, o XIX a. pabaigoje italų fiziko ir chemiko Amadeo Avogadro, anglų mokslininko Džono Daltono, Liudviko Bolcmano, Alberto Einšteino ir daugelio kitų fizikų darbai galutinai moksliškai pagrindė atominę bei molekulinę medžiagos sandarą.

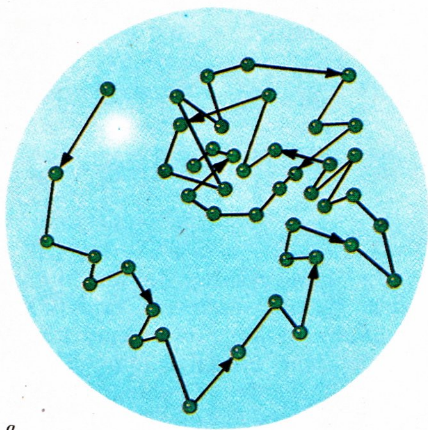
§ 3.2. Keturi pagrindiniai molekulinės kinetinės teorijos teiginiai

1. *Visos medžiagos sudarytos iš molekulių*[1].

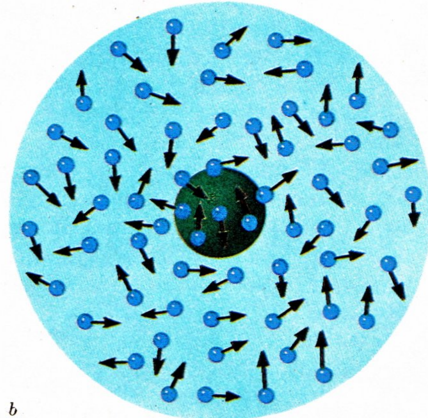
[1] Tiksliau reikėtų sakyti „iš dalelių“ (molekulių, atomų, jonų), bet čia trumpumo dėlei minėsime tik molekules.

2. *Molekulės visą laiką chaotiškai juda.* Molekulės pernelyg mažos, kad jas būtų galima pamatyti net pro pačius galingiausius optinius mikroskopus, bet jos matomos pro elektroninius mikroskopus, be to, jų egzistavimą įrodo netiesioginiai stebėjimai.

1827 m. škotų botanikas R. B r a u n a s, tyrinėdamas pro mikroskopą skysčio laše pakibusias žiedadulkes, pastebėjo, kad jos nepaliaujamai juda. Kiekviena dalelė juda padrikai ir nepriklausomai nuo gretimų dalelių. Pakartojus bandymą su kitomis dalelėmis, su dūmais, buvo gauti panašūs rezultatai. Tokie mikroskopinių dalelių judesiai vėliau buvo pavadinti **Brauno judesiais** (3.1 pav., *a*). Brauno atradimą galima paaiškinti tik tarus, kad skysčio ar dujų molekulės visą laiką chaotiškai juda ir atsimušinėdamos stumdo žymiai už save didesnes, pro mikroskopą matomas, daleles (3.1 pav., *b*). Brauno judėjimas — savaiminis ir nepaliaujamas. Tūkstančius metų išgulėjusiuose kvarco gabaluose pasitaiko vandens intarpų, ir juose taip pat pastebimi Brauno judesiai.



a



b

3.1 pav.

Kaip vyksta Brauno judesiai įvairiose aplinkose ir kaip jie priklauso nuo įvairių veiksnių, ištyrė ir apibendrino prancūzų fizikas Žanas P e r e n a s. Už tai jam 1926 m. paskirta Nobelio premija. (Įdomu pastebėti, kad lygiai prieš 300 metų Prancūzijos karališkasis teismas buvo paskelbęs mirties bausmę už mokslo apie atomus skelbimą.) Matematiškai Brauno judesius aprašė A. Einšteinas.

Molekulių judėjimą patvirtina ir tokie faktai: įnešus kokios nors kvapnios medžiagos, kvapas neužilgo pasklinda visoje patalpoje; į skaidrų indą atsargiai įpylus dviejų spalvų skysčio (lengvesnio viršuje), po kelių dienų riba tarp skysčių išnyksta, jie pastebimai susimaišo. Tai *difuzija* — savaiminis medžiagų susimaišymas. Difuzija vyksta net kietuosiuose kūnuose. Molekulių judėjimą patvirtina ir dujų slėgis bei daugelis kitų reiškinių.

3. *Tarp molekulių yra tarpai.*

Apie tai byloja ir difuzija, ir daugelis kitų reiškinių. Ištirpus kai kurioms druskoms, tirpalo tūris nepadidėja, taigi druskos molekulės pasiskirsto tarpuose tarp vandens molekulių. Šildomi kūnai plečiasi — didėja tarpai tarp molekulių; kūnas deformuojasi — tie tarpai taip pat kinta.

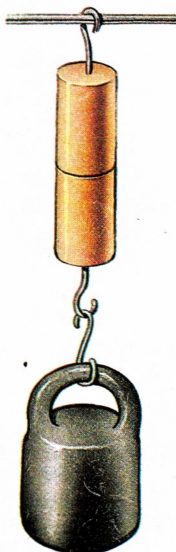
4. *Molekulės tarpusavyje sąveikauja.*

Kūnų kietumą, jų formos buvimą galima paaiškinti tiktai molekulių tarpusavio

traukos jėgų veikimu. Tik dėl traukos jėgų molekulės suartėja ir sudaro skystus bei kietus kūnus: jeigu neveiktų traukos jėgos, molekulės išsisklaidytų ir visos medžiagos pasidarytų dujinės. Traukos jėgų veikimą galima ir pademonstruoti: glaudžiai sulietus labai lygius paviršius, traukos jėgų veikiami jie stipriai sukimba (3.2 pav.).

Kita vertus, tik dėl molekulių **stūmos jėgų** veikimo visos medžiagos priešinasi gniuždymui. Jeigu jos neveiktų, suirtų sudėtinga kietųjų kūnų ir skysčių struktūra, visos medžiagos taptų „molekulių krūva".

Taigi molekulių sąveikos jėgos esti dvejopos. Tačiau jos veikia tik molekulėms esant labai arti viena kitos. Kad ir kaip dėliosime sudužusios vazos šukes, jos nesusijungs, nes neįmanoma taip suartinti kraštų, kad pradėtų veikti molekulinės jėgos. Jeigu stiklo šukių kraštus aplydysime, šukės sudūrus sukibs. Traukos jėgos pastebimai pasireiškia, kai molekulės suartėja maždaug iki nanometro (1 nm $= 10^{-9}$ m), t. y. lieka ne didesnis kaip 10 molekulės skersmenų atstumas.



3.2 pav.

Didžiausias atstumas, kuriame dar pasireiškia molekulių sąveika, vadinamas **molekulinių jėgų veikimo siekiu.**

Molekulių sąveika yra elektromagnetinės prigimties.

§ 3.3. Molekulių sistemos vidinė energija

Molekulės juda, taigi turi *kinetinės energijos.* Be to, jas riša molekulinės jėgos, taigi jos sudaro sistemą, turinčią *potencinės energijos.* Visa kūną sudarančių dalelių judėjimo ir sąveikos energija vadinama jo **vidine energija:**

$$U = E_k + E_p \, . \qquad (3.1)$$

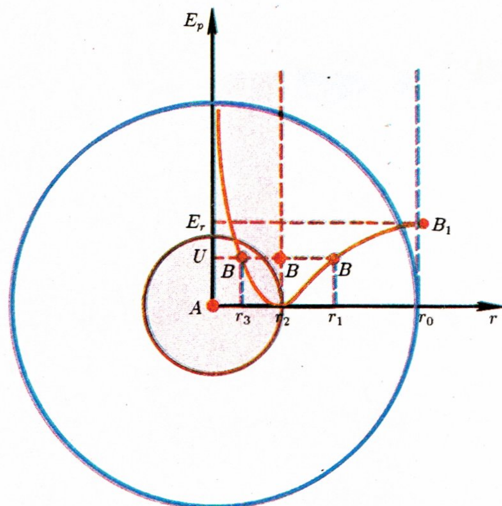
Paveikslas, atstojantis tūkstantį žodžių

Visas molekulių sąveikos ypatybes geriausiai atspindi **potencinės energijos kreivė** (3.3 pav.). Ją analizuojant, galima nustatyti, traukia ar stumia viena kitą tam tikru atstumu nutolusios molekulės, kaip kinta sąveikos potencinė energija joms suartėjant ir nutolstant. Sakykime, viena iš nagrinėjamų molekulių yra taške *A*, ir jos veikimo siekis lygus r_0. Nubrėžę per šį tašką koordinačių sistemą, horizontalioje ašyje atidedame atstumą r tarp molekulių, vertikalioje — molekulių sąveikos potencinę energiją E_p. Molekulei *B* priartėjus prie *A* arčiau kaip r_0, atsiranda traukos jėga ir sistema įgyja potencinės ir kinetinės energijos.

Pakankamai suartėjus molekulėms, nuo atstumo r_2, pradeda vyrauti sparčiai didėjanti stūmos jėga. Tačiau molekulė iš inercijos vis dar artėja — juda prieš lauko jėgas, potencinė energija didėja, lyg palaipsniui būtų gniaužiama spyruoklė, kol stūmos jėga sustabdo molekulę nuotolyje r_3 ir pradeda ją stumti į priešingą pusę; molekulė juda atgal, kol ją vėl sustabdo ėmusi vyrauti traukos jėga. Grafiko dalis žemiau

brūkšnelinės linijos E_r vadinama **potencialo duobe,** o energija E_r — **potencialo duobės gyliu.** Turėdama U vidinės energijos, molekulė B svyruos apie pusiausvyros padėtį — tašką r_2, negalėdama nutolti nuo molekulės A toliau kaip iki r_1 ir priartėti arčiau kaip iki r_3. Nuotolyje r_2 stūmos ir traukos jėgos vienodos, sistemos potencinė energija mažiausia. Toks atstumas tarp molekulių liktų visą laiką, jeigu nebūtų *šiluminio judėjimo.* (Linija U nusileistų iki r ašies.) Molekulė B tūnotų „šalčio poliuje" — potencialo duobės dugne.

Duobės gylio E_r fizikinė prasmė akivaizdi: molekulei išsilaisvinti reikia energijos, lygios šiam gyliui, todėl E_r galima vadinti dalelių ryšio energija, arba **išlaisvinimo energija.** Tiek energijos turi molekulė B_1. Molekulės B potencinę energiją grafike rodo vertikalūs atstumai nuo kreivės taškų iki r ašies, kinetinę — nuo



3.3 pav.

kreivės taškų iki U linijos. Energija U, kaip ir turi būti pagal energijos tvermės dėsnį, nekinta; ji visuomet lygi $U = E_k + E_p$.

§ 3.4. Temperatūros samprata

Temperatūros sąvoka

Nagrinėjant 3.3 paveikslą aptartų molekulės B svyravimų amplitudė priklauso nuo jos kinetinės energijos. Kūno molekulių vidutinė kinetinė energija tuo didesnė, kuo aukštesnė to kūno **temperatūra.** Fizikinė temperatūros prasmė šitokia: *temperatūra yra kūno molekulių šiluminio judėjimo vidutinės kinetinės energijos matas.* Dujose šiluminis judėjimas yra jau anksčiau aprašytasis chaotiškas molekulių judėjimas, kristaluose — virpėjimas apie pusiausvyros padėtį, skysčiuose — vienokio ir kitokio judėjimo derinys.

Žmogui temperatūros pojūtį sukelia odoje esantys jautrūs davikliai, reaguojantys į atsimušančių aplinkos molekulių smūgius.

Kaip perduodama šiluma

Molekulėms susidūrus, tarp jų įvyksta energijos persiskirstymas: molekulės, kurių energija didesnė, dalį savo energijos perduoda mažesnės energijos molekulėms. Todėl, susilietus skirtingos temperatūros kūnams, vidinė kinetinė energija perduodama iš karštesnio kūno šaltesniam; sakome, kad perduodama *šiluminė energija,* arba tiesiog *šiluma.* Šilumos perdavimas vyksta tol, kol vidutinė molekulių šiluminio judėjimo energija pasidaro vienoda. Tokioje būsenoje esančių kūnų molekulės susidūrusios tik pasikeičia vidutiniškai vienodais energijos kiekiais. Tokia dinaminė būsena vadinama **šilumine pusiausvyra.** Šiluminėje pusiausvyroje yra vienodos temperatūros kūnai.

§ 3.5. Dujų molekulinė kinetinė teorija

Šuoliui reikia įsibėgėti

Dar kartą grįžkime prie molekulių sąveikos energijos grafiko (3.3 pav.) ir pagalvokime, kas įvyks, jeigu molekulės B kinetinė energija prilygs ryšio energijai arba pasidarys dar didesnė. Aišku, jos greičio užteks traukos jėgai nugalėti ir „iššokti" iš potencialo duobės. Tada molekulė nuskris, ir tuo greičiau, kuo didesnė bus jai likusi kinetinė energija. Tokios molekulės sudarys naujos kokybės medžiagą — **dujas.** Taigi, *dujos yra tokia medžiagos agregatinė būsena, kurioje molekulių kinetinė energija yra didesnė už jų sąveikos energiją.*

Dujų molekulių greičiai matuojami šimtais metrų per sekundę.

Ką tai reiškia „idealios dujos"?

Jeigu dujos nėra labai suslėgtos arba atšaldytos, tai jų molekulės taip toli viena nuo kitos, kad praktiškai visai nesąveikauja. Dėl šios priežasties daugelis dujų savybių nepriklauso nuo jų rūšies. Tokios būsenos dujos vadinamos **idealiosiomis.** Toliau nagrinėsime tik idealiąsias dujas ir aptarsime svarbiausias jų ypatybes.

1. Idealiųjų dujų molekulių neveikia traukos jėgos. Todėl idealiųjų (beje, taip pat ir realiųjų) dujų molekulės laisvai chaotiškai juda ir tolygiai užpildo visą uždarą tūrį, o neuždarytos dujos neribotai plečiasi.

2. Dujų molekulė milijardus kartų per sekundę susiduria su kitomis molekulėmis arba su indo sienelėmis. Susidūrus pasikeičia molekulių judėjimo kryptis ir greitis. Tačiau molekulių susidūrimo nereikia suprasti tiesmukiškai: nors susidūrusios jos atšoka tarsi stangrūs rutuliukai, tačiau suartėja susidūrimo momentu tik tiek, kiek leidžia sąveikos jėgos. Priartėti prie molekulės įmanoma maždaug tik iki nuotolio r_3 (3.3 pav.). Todėl šis atstumas vadinamas **molekulės efektyviuoju skersmeniu.** Molekulių matmenys ir tarpmolekuliniai atstumai išreiškiami nanometrais.

3. Atstumas, kurį dujų molekulė nuskrieja tarp dviejų susidūrimų, vadinamas **laisvuoju keliu.** Normaliomis sąlygomis ($p = 1{,}013 \cdot 10^5$ Pa, $t = 0$ °C), šis kelias šimtus kartų ilgesnis už molekulės matmenis. Taigi molekulės laisvas judėjimas tolygiai ir tiesiai trunka kur kas ilgiau negu sąveika su kita molekule. Mums, pripratusiems prie makroskopinio pasaulio, milijardas susidūrimų per sekundę atrodo nenutrūkstamas lietimasis, o mikroskopinio molekulių pasaulio mastais — tai atitinka trumputes „bendravimo" valandėles kartą per mėnesį...

4. Dujų molekulių laisvąjį kelią, t. y. nuotolį nuo vieno susidūrimo iki kito, reikia skirti nuo vidutinio **atstumo tarp molekulių,** kuris kambario sąlygomis yra tik apie dešimt kartų didesnis už molekulių matmenis.

Stebuklingoji dėžutė

Taigi dujų molekulės „gyvena" taip erdviai, kad kiekvienai tenka tūris, bemaž 1000 kartų didesnis už jos matmenis. Ir vis dėlto viename kubiniame centimetre jų telpa neįsivaizduojama daugybė — $2{,}7 \cdot 10^{19}$, t. y. 27 milijardai milijardų! Šį skaičių sunku suvokti. Į kubinio centimetro talpos dėžutę galima supakuoti 100 m plauko, arba 1 km voratinklio, arba 2,7 mln. km ilgio „karoliukus", suvertus iš molekulių. Tai — 9 kartus iki Mėnulio, arba 67 kartus apie Žemės rutulį! Jeigu dieną naktį trauktume tuos „karoliukus" iš dėžutės 1 m/s greičiu, t. y. po 10 mlrd. molekulių kas sekundę, tai dugną išvystume tik po 90 metų.

Jeigu 1 cm^3 telpančias molekules padidintume iki Nidos kopų smiltelių dydžio,



3.4 pav.

tai jomis būtų galima užpilti visą Lietuvos teritoriją pusės metro storio sluoksniu.

3.1. Kai kalviui reikia privirinti vieną geležies gabalą prie kito, jis įkaitina abu gabalus žaizdro liepsnoje, sudeda vieną ant kito ant priekalo ir stipriai plaka kūju. Paaiškinkite, kodėl taip susidaro patvarus sujungimas.

3.2. Užlašintas ant vandens paviršiaus 0,080 mg masės alyvų aliejaus lašas pasklinda į 200 cm^2 ploto apskritą aliejaus plėvelę. Tarę, kad plėvelės storis yra tos pačios eilės kaip aliejaus molekulės skersmuo, apskaičiuokite jį.

3.3. Nesvarumo sąlygomis nebūna oro srovių konvekcijos — būtinos sąlygos degimui palaikyti. Tačiau ir tuomet žvakė arba degtukas kurį laiką dega silpna, blankia rutulio formos liepsna. Paaiškinkite tai.

3.4. 3.3 paveiksle parodykite, kas vaizduoja molekulės *B* kinetinę ir potencinę energiją jai esant kiekvienoje iš trijų padėčių.

?

1. Sklidinoje vandens stiklinėje plūduriuoja gabalas ledo (3.4 pav.). Kodėl ledui ištirpus vanduo neišsilieja?

2. Kodėl aukštesnėje temperatūroje sparčiau vyksta difuzija?

3. Kodėl orą sudarančios skirtingos dujos neišsidėsto sluoksniais virš žemės paviršiaus net esant ramiam orui?

4. 3.3 paveiksle parodykite, kas vaizduoja molekulės B kinetinę ir potencinę energiją, jai esant kiekvienoje iš trijų padėčių.

4 paskaita

MIKROPASAULIO PARAMETRAI

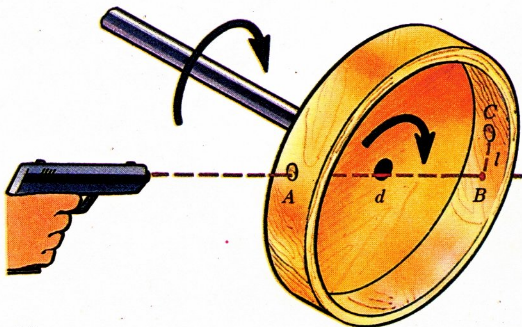
§ 4.1. Molekulių greičio matavimas

Žinoma, kad molekulių greičiai — šimtai metrų per sekundę, panašiai kaip kulkų. Kyla klausimas: kaip nustatomas šis greitis, jeigu molekulės yra nematomos? Kad lengviau tai suprastume, pirmiau pakalbėkime, kaip galima nustatyti kulkos greitį.

Uždavinys detektyvui

Variklis suka fanerinį būgną atviru dugnu (4.1 pav.). Šovus į būgną išilgai skersmens, skylutės viename ir kitame šone nebus viena prieš kitą — prakišti pro jas virbą negalėsime. Tai suprantama: kol kulka, pramušusi vieną būgno šoną, skrieja iki kito ($s_k = AB = d$), šis spėja pasisukti ir peršaunamas taške *C*, nutolusiame nuo šūvio linijos atstumu $l = BC$. Žinant, kad atstumai, nueiti per tą patį laiką, yra proporcingi greičiams, galima parašyti proporciją

$$\frac{AB}{BC} = \frac{v_k}{v_s}, \text{ arba } \frac{d}{l} = \frac{v_k}{v_s}; \qquad (4.1)$$



4.1 pav.

čia v_k — kulkos greitis, v_s — būgno sukimosi linijinis greitis. Išreiškiame kulkos greitį:

$$v_k = \frac{d \cdot v_s}{l}.$$

Jeigu būgnas apsisuka n kartų per sekundę, tai jo linijinis greitis

$$v_s = \pi dn. \quad (4.2)$$

Taigi galutinė kulkos greičio formulė:

$$v_k = \frac{d \cdot \pi dn}{l} = \frac{\pi d^2 n}{l}. \quad (4.3)$$

Šterno bandymas

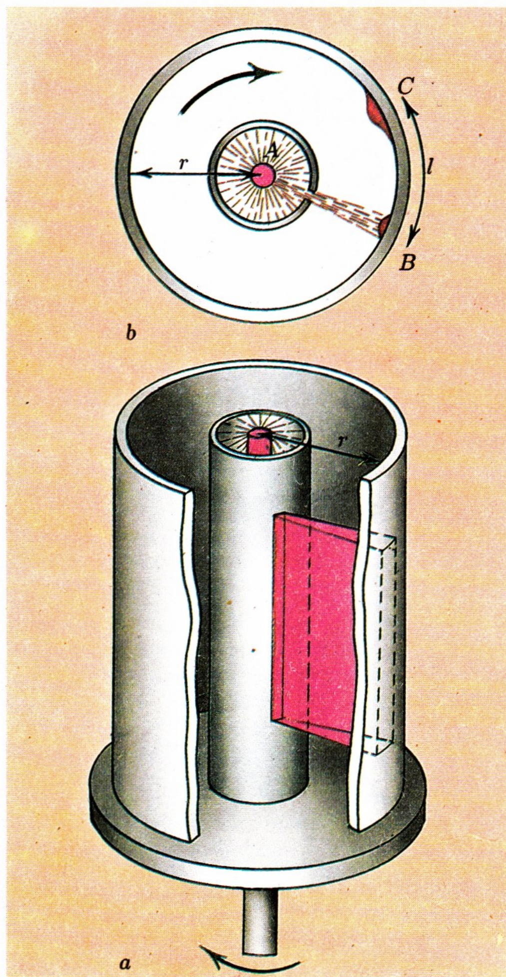
Analogišką metodą panaudojo 1920 m. vokiečių fizikas Oto Š t e r n a s molekulių greičiams tirti. Įrenginį sudarė horizontali atrama, pritvirtinta prie vertikalios elektros variklio ašies, ir ant jos sumontuoti vienas kitame du vertikalūs bendraašiai cilindrai (4.2 pav., *a*). Vidiniame cilindre išilgai ašies įtaisyta sidabruota platinos viela ir padarytas siauras vertikalus plyšys. Iš įrenginio išsiurbtas oras. Įkaitinus vielą elektros srove, sidabras garuoja ir jo molekulės lekia pro plyšį. Tai „molekulinis kulkosvaidis“, arba „molekulinis prožektorius“. Molekulių taikinys — blizganti išorinio cilindro sienelė. Čia jos nusėda ir sudaro plyšio atvaizdą (4.2 pav., *b*).

Įjungus variklį ir cilindrams tolygiai sukantis, plyšio atvaizdas pasislenka nuotoliu l. Žinant atstumą, kurį praskrenda sidabro molekulės ($s_m = AB = r$), ir išorinio cilindro sukimosi linijinį greitį (4.2), galima sudaryti proporciją, kaip ir matuojant kulkos greitį, ir apskaičiuoti sidabro molekulių greitį. Jis pasirodė esąs maždaug 600 m/s.

4.1. Remdamiesi 4.2 paveikslu, *b*, ir (4.1) proporcija, išveskite molekulių greičio formulę

$$v_m = \frac{\pi drn}{l}. \quad (4.4)$$

4.2. 4.2 paveiksle pavaizduoto prietaiso molekulių greičiams matuoti išorinis cilindras yra 240 mm skersmens. Įkaitinus vielą elektros srove ir pradėjus sukti cilindrą 3000 aps/min greičiu, sidabro molekulių „taikinys“ pasislinko 8 mm. Apskaičiuokite sidabro molekulių greitį.



4.2 pav.

Kodėl kvapas plinta lėtai?

Dujų molekulių greičiai teoriškai buvo apskaičiuoti jau XIX a. antroje pusėje. Tačiau to meto fizikams buvo sunku patikėti, kad dujų molekulės juda tokiais milžiniškais greičiais. Juk gerai žinoma, kad kvapai net palankiausiomis sąlygomis plinta ne didesniu kaip 1 m/s greičiu.

Šterno bandymas išsklaidė abejones ir dar kartą patvirtino kinetinės dujų teorijos teiginius.

Už molekulių greičio matavimo metodo sukūrimą O. Šternui 1943 m. buvo paskirta Nobelio premija.

Molekulių chaotiško judėjimo greičiai

Dar 1850 m. Džeimsas Maksvelis matematiškai įrodė, kad molekulių chaotiško judėjimo greičiai dujose turi būti įvairūs. Šterno bandymas tai patvirtino: buvo atkreiptas dėmesys į tai, kad, įrenginiui (4.2 pav., *a*) nejudant, nusėdusios sidabro molekulės sudaro gana ryškų plyšio atvaizdą (*B*). Sistemai sukantis plyšio atvaizdas pasidaro platesnis, neryškiais kraštais (4.2 pav., *b*, *c*). Tai rodo, kad sidabro molekulių greičiai yra nevienodi — jų vertės pasiskirsto tam tikrame intervale.

Skaičiuojant priklausančius nuo molekulių greičio jų sistemos parametrus (slėgį, energiją), naudojamasi molekulių **vidutiniu kvadratiniu greičiu** ($\bar{v}$):

$$\bar{v}=\sqrt{\frac{v_1^2+v_2^2+v_3^2+\ldots+v_n^2}{n}}; \qquad (4.5)$$

čia n — molekulių skaičius.

Vidutinis kvadratinis greitis — realus fizikinis dydis; nuo jo priklauso vidutinė molekulių kinetinė energija, taigi ir kūno temperatūra.

§ 4.2. Molekuliniai dydžiai

Kur prasideda mikropasaulis?

Ten, kur jau nepadeda įžvelgti net pati tobuliausia optika ir elektronika — 10^{-10} m atstumuose — baigiasi klasikinė fizika ir prasideda sunkiai įsivaizduojamas **mikropasaulis.** Neįprastiems vaizdiniams nusakyti reikalingi nauji parametrai ir nauji matavimo vienetai.

Matuoti įprastiniais vienetais molekulių mases yra nepatogu, nes, pavyzdžiui, vandenilio molekulės masė yra $3{,}4\cdot10^{-27}$ kg, deguonies — $53{,}5\cdot10^{-27}$ kg, vandens — $3{,}1\cdot10^{-26}$ kg ir pan. Operuoti tokiais dydžiais labai keblu, todėl molekulinėje fizikoje yra įvestas naujas masės matavimo vienetas — **atominis masės vienetas** 1 $u=$ $=1{,}6\cdot10^{-27}$ kg. Jis prilygsta 1/12 daliai anglies atomo masės. Visų kitų elementų molekulių masės lyginamos su šiuo vienetu ir tik nurodoma, kiek kartų jos yra didesnės, nes mažesnės už u masės molekulių pasaulyje nėra. Skaičius, rodantis, kiek kartų molekulės (arba atomo) masė yra didesnė už atominį masės vienetą, vadinamas santykine **molekuline (atomine) mase;** ją žymime m_s. Pavyzdžiui, deguonies santykinė molekulinė masė lygi 16, anglies — 12, vandenilio — 2, azoto — 28.

Nuostabus skaičius

Paėmus 16 g deguonies, 12 g anglies arba 2 g vandenilio, t. y. paėmus bet kokios medžiagos tiek gramų, kokia yra santykinė molekulinė masė, joje bus vienas ir tas pats molekulių skaičius — $6{,}023\cdot10^{23}$! Šį dėsningumą atrado dar XIX a. pradžioje italų mokslininkas Amadeo Avogadras. Atradimas nustebino pasaulį. Jis buvo prilygintas tokiems mokslo žygdarbiams, kaip šviesos greičio nustatymas. Atradėjo garbei šis skaičius buvo pavadintas **Avogadro skaičiumi.** Jį žymime N_A.

Molis — medžiagos kiekio vienetas

Molekulinėje fizikoje, kaip ir chemijoje, yra vartojamas specialus fizikinis dydis **medžiagos kiekis** (ν). Medžiagos kiekio vienetas pavadintas **moliu** (*mol*). Molis — tai medžiagos kiekis, kuriame yra Avogadro skaičius molekulių (atomų). Molis yra vienas iš pagrindinių SI vienetų.

Norint praktiškai atseikėti tokį medžiagos kiekį, imama tiek gramų reikalingos medžiagos, kokia yra jos santykinė molekulinė masė. Vieno **molio masę** žymime raide M. Taigi

$$M = \frac{m}{\nu}; \qquad (4.6)$$

čia m — medžiagos kiekio ν masė.

Vieno molio medžiagos tūrį — **molio tūrį** — žymėsime V_{mol}.

Avogadro dėsnis

A. Avogadras atrado, kad *vienodomis sąlygomis bet kurių dujų vieno molio tūris yra vienodas*. Pavyzdžiui, normaliosiomis sąlygomis (kai slėgis lygus 101,3 kPa ir temperatūra 0 °C) jis lygus 0,0224 m^3. Taigi vienodas skaičius bet kurių dujų molekulių užima vienodą tūrį.

Lošmidto skaičius

Vadinasi, ir vienetiniame bet kurių dujų tūryje turi būti vienodas molekulių skaičius:

$$\frac{N_A}{V_{mol}} = \frac{6{,}023 \cdot 10^{23}\,\text{molek./mol}}{0{,}0224\ \text{m}^3/\text{mol}} =$$

$$= 2{,}7 \cdot 10^{25}\ \frac{\text{molek.}}{\text{m}^3} = N_L.$$

Molekulių skaičius, esantis dujų tūrio vienete normaliosiomis sąlygomis (§ 7.1), pavadintas **Lošmidto skaičiumi** ir žymimas N_L.

§ 4.3. Molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinė lygtis

Avogadro dėsnis akivaizdžiai įrodo, kad dujų užimamą tūrį lemia atstumai tarp molekulių, o ne jų pačių matmenys.

Kodėl dujos slegia?

Dujų molekulės milijardus kartų per sekundę susiduria su indo sienelėmis. Nepaliaujama molekulių liūtis sudaro slėgimo jėgą, galinčią ne tik išpūsti vaikišką balionėlį, bet ir judinti variklio stūmoklį, sprogdinti uolienas. Tai reiškinys, vadinamas **dujų slėgiu.** Kaip žinome, slėgis yra lygus jėgos F, veikiančios statmenai paviršių, ir to paviršiaus ploto S santykiui:

$$p = \frac{F}{S}. \qquad (4.7)$$

SI slėgis matuojamas **paskaliais** ($1\ \text{Pa} = \frac{1}{1}\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$). Prietaisai slėgiui matuoti vadinami *manometrais*.

Tiltas tarp mikro ir makro pasaulių

Koks yra dujų slėgio ryšys su dujų molekulėmis ir jų judėjimu? Šį ryšį, taikydamas molekulinę kinetinę teoriją, pirmasis nustatė 1738 m. šveicarų kilmės mokslininkas Danielis B e r n u l i s. Jo formulę priimsime be įrodymo:

$$p = \frac{1}{3} n_0 m_0 \bar{v}^2; \qquad (4.8)$$

čia n_0 — molekulių skaičius vienetiniame tūryje, t.y. molekulių koncentracija ($\frac{\text{molek}}{\text{m}^3}$), m_0 — vienos molekulės masė (kg), $\bar{v}^2$ — greičio kvadrato vidurkis ($\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$).

Galimas ir kitas šios lygties variantas. Kadangi $\frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \bar{E}_k$ — vidutinė molekulės kinetinė energija, tai Bernulio lygtį galima perrašyti šitaip:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_k. \quad (4.9)$$

Taigi dujų slėgis tuo didesnis, kuo stipriau vidutiniškai smogia kiekviena molekulė ir kuo dažnesni jų smūgiai.

(4.9) formulė vadinama **molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindine lygtimi.** Ji labai svarbi, nes sieja slėgį — makroskopinį dydį, kurį galima išmatuoti manometru, su mikroskopiniais molekulių parametrais.

§ 4.4. Dujų slėgis gamtoje ir technikoje

Mes gyvename audringo dujų okeano — atmosferos — dugne. Keleto šimtų kilometrų storio oro sluoksnis $5{,}15 \cdot 10^{15}$ t mase slegia visa, kas yra Žemėje. Žmogus išmoko valdyti dujų slėgį, jį keisti ir panaudoti savo tikslams. Technikoje reikalingi ir dideli, ir maži dujų slėgiai. Aukšto slėgio garai suka turbinų mentes, įkaitusios dujos varo mašinų stūmoklius, parako dūmai stumia sviedinį patrankos vamzdyje.

Kur prasideda vakuumas?

Praretintas dujas, kurių slėgis daug mažesnis už atmosferos slėgį, įprasta vadinti **vakuumu** (tuštuma). Vakuumas skirstomas į mažą — $p > 100$ Pa, vidutinį — $p = 100...0{,}1$ Pa, didelį — $p < 0{,}1$ Pa ir superdidelį — $p << 0{,}1$ Pa. Net pačiame didžiausiame, kokį gali pasiekti šiuolaikinė technika, vakuume, kur $p = 10^{-12}$ Pa, kiekviename kubiniame milimetre lieka po keliasdešimt molekulių. Tačiau dideliame vakuume molekulės jau beveik nesusiduria tarpusavyje ir jų laisvasis kelias priklauso tik nuo indo matmenų.

Technikoje vakuumas sudaromas Rentgeno vamzdžiuose, televizorių kineskopuose, radijo lempose ir daugelyje kitų prietaisų. Vakuume sparčiai džiovinama, dažoma, impregnuojama, metalizuojama, tobulai suvirinami metalai. Tik vakuume gaminami puslaidininkiniai prietaisai.

Oriono ūko mįslė

Idealiausias natūralus vakuumas turėtų būti tarpžvaigždinėje erdvėje. Iki XIX a. pabaigos taip ir buvo galvojama. Vėliau ir kosminėje erdvėje aptikta labai praretėjusios medžiagos — tarpžvaigždinių dujų ir dulkių[1]. Toji medžiaga daugiausia yra susitelkusi į milžiniškus netaisyklingos formos debesis, vadinamus **dujų** arba **dulkių ūkais.** Švytintis Oriono ūkas giedrią naktį matomas net plika akimi. Dujų ūkuose yra po keletą molekulių kubiniame centimetre. Dulkių koncentracija ūkuose siekia vos keletą dalelių milijone kubinių metrų, ir vis dėlto ūkai sudaro beveik 3% mūsų Galaktikos masės.

? *1. Ar gali taip atsitikti, kad, šovus į diską, kaip parodyta 4.1 paveiksle, jame atsirastų tik viena skylutė?*
2. Kodėl, matuojant molekulių greitį, iš Šterno įrenginio išsiurbiamas oras?
3. Kodėl greitesnės už kulką dujų molekulės neperšauna vaikiško balionėlio?

4.3. Apskaičiuokite helio ir angliarūgštės dujų molekulių vidutinį kvadratinį greitį ir vidutinę slenkamojo judėjimo energiją normaliosiomis sąlygomis.

[1] Siūlome paskaityti A. Ažusienio knygelę „Tarpžvaigždinės medžiagos fizika“ („Fizikos mokykla“, Nr. 15. V.: Mokslas, 1990).

1.2 skyrius
DUJŲ DĖSNIAI

„Oras tai ne niekas, bet tūlas daiktas, kursai užima vietą. Oro negalime pačiupinėti, kaip akmenį ar vandenį, bet jį galime jausti ir lytėti. Mes galime jį ir matyti, jeigu jo storumas bus didelis.“

Iš pirmojo lietuviško fizikos vadovėlio (P. Vileišis. „Populiariškas rankvedis fyzikos“, Vilnius, 1905)

5 paskaita
DUJŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

§ 5.1. Makroskopiniai dujų parametrai

Trys dujų izoprocesai

Nagrinėdami dujų molekulių mases, greičius, energijas ir kt., įsitikinome, kad šie molekules apibūdinantys dydžiai lemia kitus nuo visų molekulių bendro veikimo priklausančius makroskopinius fizikinius dydžius — *slėgį* ir *temperatūrą*. Trys fizikiniai dydžiai: slėgis, tūris ir temperatūra pilnutinai apibūdina dujų būseną. Jie vadinami **termodinaminiais dujų parametrais.**

Jeigu vienas kuris dujų parametras kinta, tai būtinai turi kisti ir vienas kuris arba ir abu kiti parametrai — vyksta **dujų procesas.** Procesai, kuriuose masė ir vienas iš trijų parametrų — *p, V* arba *t* — nekinta, vadinami **izoprocesais** (gr. *izos* — vienodas). Izoprocesai yra trys:
izoterminis — kai pastovi temperatūra,
izobarinis — kai pastovus slėgis (gr. *baros* — sunkumas) ir
izochorinis — kai pastovus tūris (gr. *chōra* — erdvė).

Izoprocesai nuolat vyksta atmosferoje, jie plačiai pritaikomi technikoje.

§ 5.2. Boilio ir Marioto dėsnis

Spyruoklė, kuri niekad nelūžta

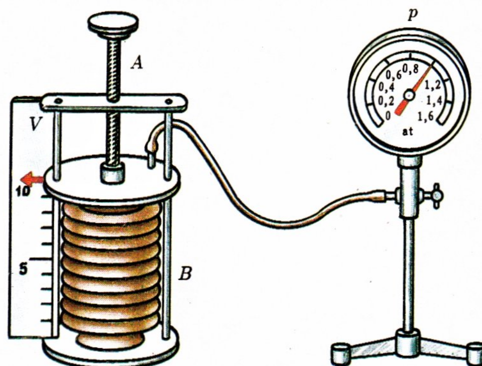
Oro savybės nuo seno traukė gamtos tyrinėtojų dėmesį. Jį tyrė Galileo G a l i l ė j u s ir Evandželista T o r i č e l i s, o 1662 m. anglų mokslininkas Robertas B o i l i s savo knygoje „Nauji eksperimentai, susiję su oro standumu“ paskelbė pirmąjį dujų dėsnį: „Oras tirštėja proporcingai jį slegiančiai jėgai“. Praėjus 14 metų prancūzų fizikas Edmas M a r i o t a s, nepriklausomai nuo Boilio tyręs dujas, paskelbė analogiškus savo darbus. Mariotas geriau už Boilį suprato šio dėsnio reikšmę ir numatė įvairius jo pritaikymus, kurių svarbiausias — vietovės aukščio nustatymas pagal barometrinį slėgį. Be to, Mariotas tyrė įvairias dujas ne vien jas slegiant, bet ir retinant ir, kas svarbiausia,— *pastovios temperatūros sąlygomis.*

Apibendrinus visus tyrimus, buvo suformuluotas **Boilio ir Marioto dėsnis:** *kai dujų masė ir temperatūra nekinta, jų slėgio ir tūrio sandauga yra pastovi:*

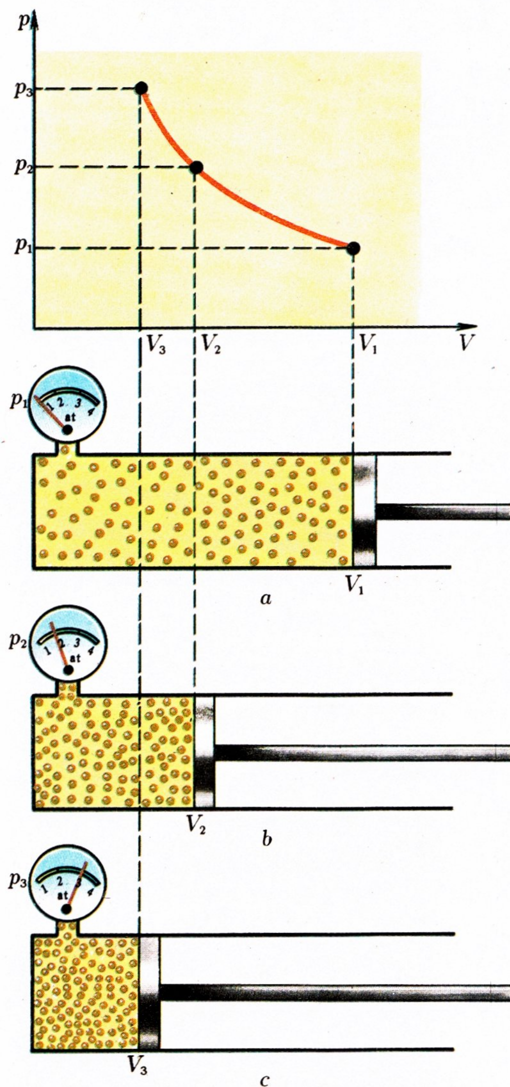
$$p_1V_1 = p_2V_2 = p_3V_3 = ... = p_nV_n,$$

arba trumpiau

$$pV = \text{const}. \qquad (5.1)$$



5.1 pav.



5.2 pav.

Sprendžiant praktinius uždavinius, dažniausiai tenka nagrinėti dvi dujų būsenas (pradinę — 1 ir galutinę — 2). Tuomet dėsnį užrašome:

$$p_1V_1 = p_2V_2;$$

iš čia

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \qquad (5.2)$$

Taigi *dujų slėgis yra atvirkščiai proporcingas tūriui.* Boilio ir Marioto dėsnį nesunku patikrinti 5.1 paveiksle atvaizduotu prietaisu. Sukant sraigtą *A*, kinta cilindro *B* tūris ir manometro rodomas slėgis *p*. Panašų bandymą galima atlikti manometrą prijungus prie cilindro, kuriame slankioja stūmoklis (5.2 pav., *a, b, c*). Atlikę keletą bandymų ir gavę *V* ir *p* vertes, galime nubraižyti dujų slėgio priklausomybės nuo tūrio grafiką — **izotermę** (5.2 pav.).

Kada negalioja idealiųjų dujų dėsniai

Boilio ir Marioto dėsnis tinka idealiosioms dujoms. Kuo didesnis slėgis arba žemesnė temperatūra, tuo labiau nukrypstama nuo šio dėsnio.

▲ 5.1. 12 l talpos indas su $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa slėgio dujomis sujungiamas su kitu 3 l talpos visai tuščiu indu. Koks bus galutinis slėgis, jei procesas izoterminis?

---

§ 5.3. Gei-Liusako dėsnis

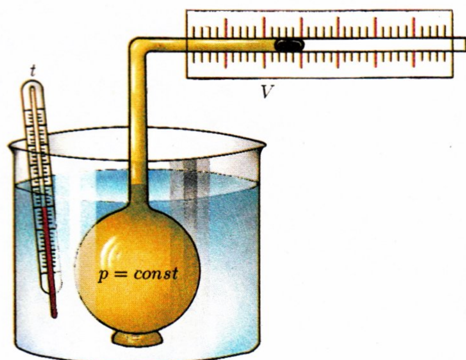
Kurios dujos sparčiau plečiasi?

Prancūzų fizikas G e i-L i u s a k a s (1778—1850) užsibrėžė tikslą — nustatyti įvairių dujų **šiluminio plėtimosi koeficientus.** Įvairių kietųjų kūnų ir skysčių koeficientai jau buvo apskaičiuoti.

Šiluminio plėtimosi koeficientas išreiškiamas formule

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}, \qquad (5.3)$$

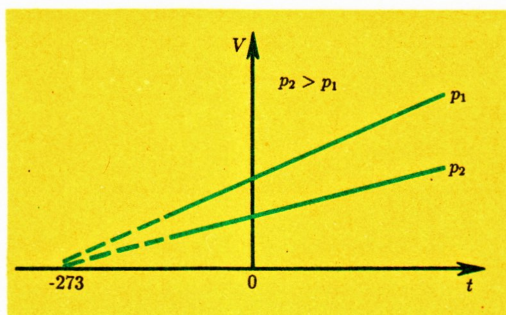
kurioje V_0 — tūris 0 °C temperatūroje, V_t — jų tūris pašildžius iki temperatūros *t*. Taigi *šiluminio plėtimosi koeficientas*



5.3 pav.

Matome, kad dujų tūris tiesiškai didėja kylant temperatūrai. Aprašytasis procesas grafiškai atvaizduotas 5.4 paveiksle. Tiesė, vaizduojanti dujų tūrio priklausomybę nuo temperatūros, kai slėgis yra pastovus, vadinama **izobare.**

Žemų temperatūrų srityje izobarės turėtų kirsti temperatūrų ašį taške —273 °C. Tačiau tai nereiškia, kad dujų tūris gali sumažėti iki nulio. Visos dujos smarkiai atšaldytos suskystėja, todėl šios grafikų dalys nubrėžtos punktyru.



5.4 pav.

β *rodo, kuria dalimi pradinio tūrio* (V_0) *pakinta dujų tūris, temperatūrai pakitus vienu laipsniu.*

Tiriamų dujų masę Gei-Liusakas atskyrė nuo atmosferos gyvsidabrio lašeliu, slankiojančiu horizontaliame vamzdelyje (5.3 pav.). Tokiu būdu inde su dujomis buvo palaikomas pastovus slėgis, taigi dujų tūris priklausė tik nuo temperatūros — buvo tiriamas izobarinis procesas.

Apskaičiavęs iš bandymų duomenų įvairių dujų šiluminio plėtimosi koeficientus, Gei-Liusakas nustebo atradęs, kad visų *dujų šiluminio plėtimosi koeficientai yra vienodi ir lygūs* $1/273\ °C^{-1}$:

$$\beta = \frac{1}{273}\ °C^{-1}. \qquad (5.4)$$

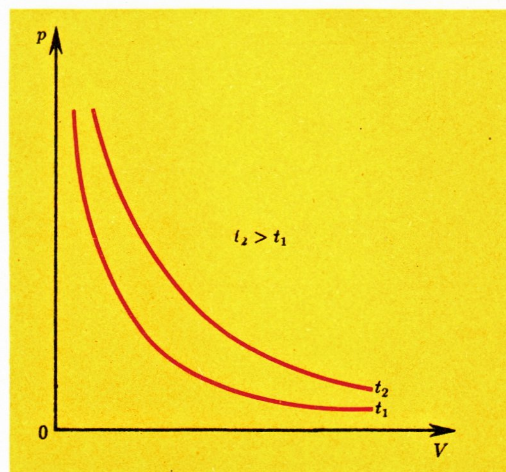
Pasitelkime matematiką

Sprendžiant praktinius uždavinius, dažniausiai tenka skaičiuoti pasikeitusį, pakitus temperatūrai, dujų tūrį V_t. Jį galima išsireikšti iš (5.3) formulės:

$$V_t = V_0(1 + \beta t).$$

Įrašę β vertę, gausime:

$$V_t = V_0\left(1 + \frac{t}{273\ °C}\right). \qquad (5.5)$$



5.5 pav.

▲ 5.2. Pro gyvenamojo namo ventiliacijos vamzdį eina iš lauko —26 °C temperatūros oras. Kokį tūrį užims kiekvienas lauko oro kubinis metras kambaryje, įšilęs iki 23 °C?

? *1. Kokius procesus tyrė Boilis ir Mariotas, Gei-Liusakas?*
2. Kaip vadinama matematikoje izotermės kreivė?
3. Įrodykite, kad izotermė t_2 (5.5 pav.) atitinka aukštesnę tos pačios dujų masės temperatūrą.
4. Įrodykite, kad izobarė p_2 (5.4 pav.) atitinka aukštesnį tos pačios dujų masės slėgį.
5. Kodėl visų izobarių tęsiniai susikerta viename taške?
6. Nubraižykite izobarę p, V koordinačių sistemoje.

5.3. Indą su $1{,}4 \cdot 10^5$ Pa slėgio dujomis sujungus su tuščiu 6 l talpos indu, juose nusistovi $1{,}0 \cdot 10^5$ Pa slėgis. Koks pirmojo indo tūris? (Procesas izoterminis.)

5.4. Koks slėgis susidarys tramvajaus vagono pneumatinio siurblio rezervuare, įpūtus orą 250 kartų, jeigu rezervuaro talpa 30 l, o siurblys vienu kartu įtraukia 600 cm^3 normalaus slėgio oro? Temperatūros kitimo nepaisome.

6 paskaita

ŠALČIO POLIAUS BEIEŠKANT

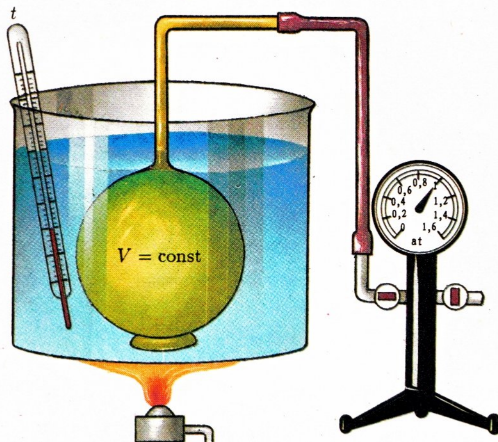
„Šalčio, kaipo tokio, nėra. Yra tik šilumos nebuvimas. Šaltis slypi ne materijoje, o jautriame kūne".

Galileo Galilėjus

§ 6.1. Šarlio dėsnis

Sensacija Paryžiaus parke

Prancūzų mokslininkas Žakas Šarlis (1746—1823) išgarsėjo tuo, kad 1783 m., stebint šimtams tūkstančių žiūrovų, pirmasis istorijoje pakilo balionu, pripildytu ne karšto oro, o naujai atrastų lengvesnių už orą dujų vandenilio. Tačiau fizikoje Ž. Šarlį išgarsino ne sensacingas skrydis, o tai, kad 1787 m. jis ištyrė, kaip įvairių dujų slėgis priklauso nuo temperatūros.



6.1 pav.

Kokį procesą tyrė Šarlis

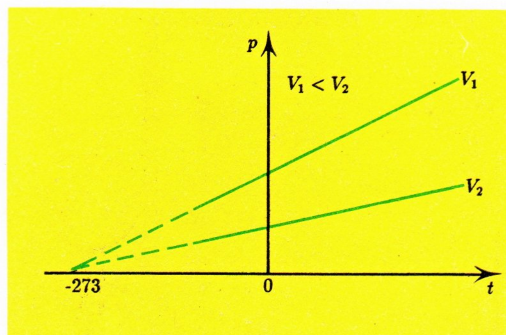
Uždarame inde kaitinamos dujos (6.1 pav.) negali plėstis, todėl didėja slėgis į sieneles — vyksta izochorinis procesas. (Dviračio padangos, įšilusios saulėje, darosi kietesnės.) Šarlis matavo, kaip kinta dujų slėgis priklausomai nuo temperatūros ir skaičiavo įvairių dujų **šiluminius slėgio koeficientus** (γ). Šis koeficientas apibrėžiamas formule

$$\gamma = \frac{p_t - p_0}{p_0 t}, \qquad (6.1)$$

kurioje p_0 — dujų slėgis 0 °C temperatūroje, p_t — jų slėgis temperatūroje t. Taigi *šiluminis slėgio koeficientas γ rodo, kuria dalimi pradinio slėgio (p_0) pakinta dujų slėgis, temperatūrai pakitus vienu laipsniu.*

Apskaičiavęs įvairių dujų šiluminius slėgio koeficientus, Šarlis atrado, kad *visų dujų šiluminiai slėgio koeficientai yra vienodi ir lygūs* $1/273\ °C^{-1}$:

$$\gamma = 1/273\ °C^{-1}. \qquad (6.2)$$



6.2 pav.

Iš (6.1) formulės išreiškiame galutinį slėgį:

$p_t = p_0(1+\gamma t)$ ir įrašome $\gamma = 1/273\ °C^{-1}$; gauname

$$p_t = p_0\left(1+\frac{t}{273\ °C}\right). \qquad (6.3)$$

Dujų slėgis, kylant temperatūrai, tiesiškai didėja.

Aprašytasis procesas grafiškai atvaizduotas 6.2 paveiksle. Tiesė, vaizduojanti dujų slėgio priklausomybę nuo temperatūros, kai tūris yra pastovus, vadinama **izochore.**

Dvyniai koeficientai

Palyginkime du dėsnius: jeigu dujos šildomos gali laisvai plėstis, tai, pašildžius vienu laipsniu, jos išsiplečia 1/273 dalimi, o jeigu dujos šildomos uždarame inde, tai lygiai tiek pat padidėja jų slėgis: $\gamma = \beta$.

§ 6.2. Termodinaminė temperatūros skalė

Kada išnyksta dujų slėgis?

Remiantis (6.3) formule, galima apskaičiuoti temperatūrą, kurioje dujos nustotų slėgusios sieneles, t. y. būtų $p_t = 0$:

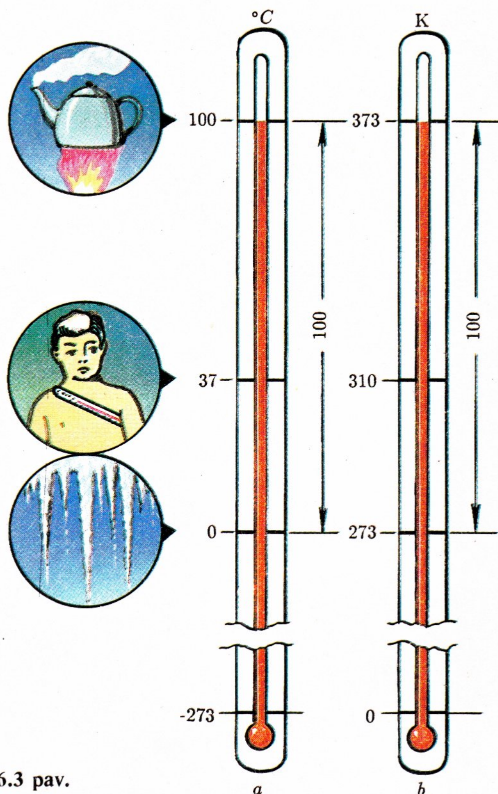
$$p_0\left(1+\frac{t}{273\ °C}\right) = 0;$$

kadangi $p_0 \neq 0$, tai $1+\frac{t}{273\ °C} = 0;$

$$t = -273\ °C \text{ (tiksliau } -273{,}16\ °C).$$

Dingsta „šalčio laipsniai“

Šią temperatūrą, už kurią žemesnės gamtoje negali būti, nes negali būti neigiamo dujų slėgio, anglų fizikas Viljamas K e l v i n a s (1824—1907) pasiūlė priimti naujos temperatūrų skalės pradžia ir pavadino **absoliutiniu nuliu.** Laipsnio didumas



6.3 pav.

buvo paliktas toks pat kaip Celsijaus skalėje.

Naujoji temperatūros skalė vadinama **termodinamine,** o pagal ją reiškiama temperatūra — **termodinamine** arba **absoliutine temperatūra.** Absoliutinė temperatūra žymima raide *T*. Jos vienetas (nors jis — tokio pat didumo kaip Celsijaus laipsnis) vadinamas **kelvinu (K).** Kelvinas yra pagrindinis SI vienetas. Kelvino skalėje (6.3 pav., *b*) ledo tirpimo temperatūra yra lygi 273 K, vandens virimo temperatūra lygi 373 K; apskritai

$$T = (273 + t^*)\ \text{K}. \qquad (6.4)$$

Vartojant termodinaminę temperatūros skalę, kaip matysime, žymiai supaprastėja dujų dėsnių išraiškos, palengvėja skaičiavimai.

§ 6.3. Naujos dujų dėsnių formulės

(6.3) formulėje temperatūrą, išreikštą Celsijaus laipsniais, pakeiskime termodinamine temperatūra. Atlikę veiksmus skliaustuose, gausime:

$$p_t = p_0 \frac{273\ ^\circ\text{C} + t}{273\ ^\circ\text{C}}.$$

Tačiau $273\ ^\circ\text{C} + t = T$, o $273\ \text{K} = T_0$, taigi

$$p_t = p_0 \frac{T}{T_0}, \text{ arba } \frac{p_t}{p_0} = \frac{T}{T_0}.$$

Apibendriname bet kokiai pradinei temperatūrai:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (6.5)$$

Taip užrašytas Šarlio dėsnis dar giliau atskleidžia savo fizikinį turinį: *kai dujų tūris nekinta, jų slėgis yra tiesiog proporcingas absoliutinei temperatūrai.*

* Čia *t* — Celsijaus temperatūros skaitinė vertė.

Analogiškai galima užrašyti ir Gei-Liusako dėsnį:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (6.6)$$

Kai dujų slėgis nekinta, jų tūris yra tiesiog proporcingas absoliutinei temperatūrai.

▲ **6.1.** Naudodamiesi nauja Gei-Liusako dėsnio formule (6.6), išspręskite dar kartą 5.2 uždavinį; palyginkite su jo sprendimu praeitą paskaitą.

▲ **6.2.** Elektros lempa gaminant pripildoma $5{,}065 \times 10^4$ Pa slėgio 288 K temperatūros azoto. Kokia yra dujų temperatūra degančioje lempoje, jeigu slėgis tada pakyla iki $1{,}1 \cdot 10^{-5}$ Pa?

▲ **6.3.** Dujų temperatūrai pakilus nuo 286 iki 325 K, slėgis padidėjo 120 mm Hg. Koks buvo pradinis jų slėgis? Procesas izochorinis.

? *1. Įrodykite, kad izochorė V_2 (6.2 pav.) atitinka didesnį tos pačios masės dujų tūrį.*
2. Kodėl visos izochorės susikerta viename taške?
3. Nubraižykite izochorę p, V koordinačių sistemoje.

■ **6.4.** Uždarame balione esančias dujas įšildžius nuo 300 iki 360 K, slėgis padidėjo 8,0 at. Raskite pradinį dujų slėgį. (Baliono plėtimosi nepaisykite.)

■ **6.5.** Nubraižykite izochorinio proceso grafikus koordinačių *p* ir *T*, *V* ir *T*, *p* ir *V* sistemose.

---

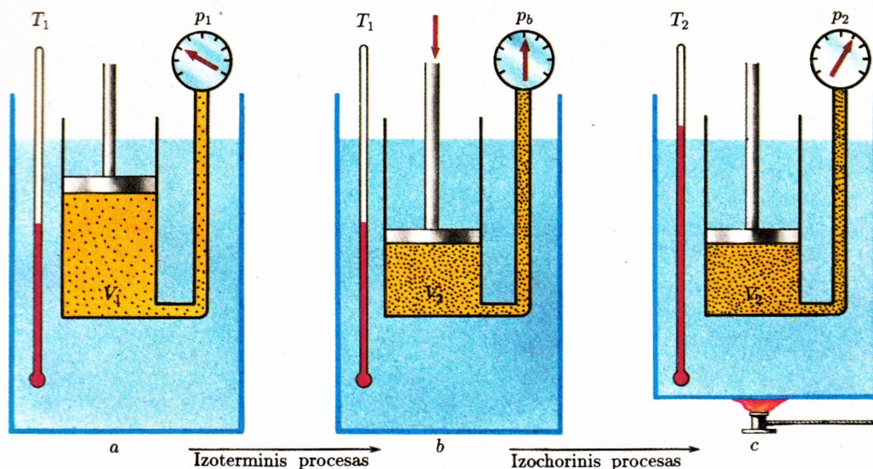
7 paskaita

KĄ JUNGIA JUNGTINIS DUJŲ DĖSNIS?

§ 7.1. Klapeirono lygtis

Ne vien izoprocesai

Visi trys išnagrinėtieji dujų dėsniai pritaikomi gana ribotai — tik kai vienas iš dujų parametrų vykstant procesui nekinta. Tačiau praktikoje dažnai susiduriama su tokiais



7.1 pav.

procesais, kai vienu metu kinta visi trys dujų parametrai. Pavyzdžiui, vidaus degimo variklyje, užsidegus dujoms, kyla jų temperatūra, dujos plečiasi, didėja slėgis. Kylant oro balionui, atmosferos slėgis mažėja, temperatūra krinta, balionas pučiasi. Reikia mokėti skaičiuoti, valdyti ir tokius procesus. Šią problemą 1834 m. išsprendė prancūzų fizikas Benua K l a p e i r o n a s (1799—1864). Jis išvedė universalią lygtį, jungiančią visų trijų dujų izoprocesų dėsnius ir tinkamą spręsti bet kokiems dujų būsenos kitimo uždaviniams.

Du žingsniai iki Klapeirono lygties

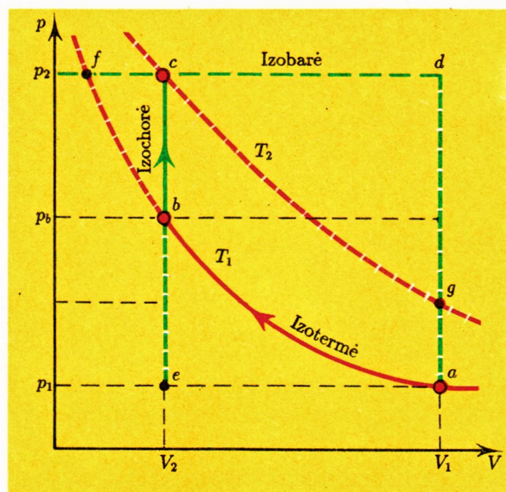
Sakykime, pradinę dujų būseną nusako parametrai V_1, p_1, T_1 (7.1 ir 7.2 pav., *a*). Įvykus tam tikriems procesams, pakito visi trys parametrai ir jų vertės pasidarė V_2, p_2 ir T_2 (7.1 ir 7.2 pav., *c*) — liko pastovi tik masė. Dujų būsenos kitimą nuo pradinės iki galutinės galime sąlygiškai išskaidyti į du procesus:

1. Dujas izotermiškai suspaudžiame iki tūrio V_2 (7.1 ir 7.2 pav., $a \rightarrow b$); tada gauname jų parametrus V_2, p_b, T_1. Sudarome lygtį

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_b}{p_1};$$

iš jos išreiškiame tarpinį slėgį

$$p_b = \frac{V_1 p_1}{V_2}.$$



7.2 pav.

2. Užfiksuojame stūmoklį ir, nekeisdami tūrio, izochoriškai šildome dujas iki reikiamos temperatūros T_2 (7.1 ir 7.2 pav., $b \to c$). Slėgis pakyla iki p_2.

Remdamiesi Šarlio dėsniu, galime parašyti:

$$\frac{p_b}{p_2}=\frac{T_1}{T_2}; \text{ iš čia } p_b=\frac{p_2 T_1}{T_2}.$$

Užrašome to paties slėgio p_b dviejų išraiškų lygybę

$$\frac{V_1 p_1}{V_2}=\frac{p_2 T_1}{T_2}$$

ir pertvarkome lygtį taip, kad vienos būsenos parametrai būtų vienoje pusėje:

$$\frac{V_1 p_1}{T_1}=\frac{V_2 p_2}{T_2}. \qquad (7.1)$$

Pakeitę parametrus iki V_3, p_3, T_3 ir t. t., gautume analogiškus santykius:

$$\frac{V_1 p_1}{T_1}=\frac{V_2 p_2}{T_2}=\frac{V_3 p_3}{T_3}=\ldots=\frac{V_n p_n}{T_n}.$$

Galime užrašyti bendro pavidalo lygybę

$$\frac{Vp}{T}=\text{const}. \qquad (7.2)$$

Svarbiausias dujų dėsnis

Išvedėme **Klapeirono lygtį:** *dujų tūrio ir slėgio sandauga, padalinta iš absoliutinės temperatūros, yra pastovus dydis* (nepamirškime: kai dujų masė nekinta). Šis ryšys dar vadinamas **jungtiniu dujų dėsniu** arba **dujų būsenos lygtimi.**

Penki keliai iš taško *a* į tašką *c*

7.2 paveiksle matome, kad iš taško *a* į tašką *c* galima pereiti įvairiais keliais. Vadinasi, Klapeirono lygtį galima išvesti nuosekliai pritaikius bet kuriuos du dujų būsenos kitimo procesus: pavyzdžiui, izochoriškai kaitinant suslėgti dujas iki p_2 (izochorė a—d), o paskui izobariškai šaldant sumažinti tūrį iki V_2 (izochorė d—c).

Klapeirono lygtis užbaigia ir apvainikuoja visus eksperimentinius dujų procesų tyrimus.

Trijų dujų dėsnių matematinės išraiškos pasirodė besančios tik atskiri Klapeirono lygties atvejai. Dujų dėsnį (6.7) pritaikę izoprocesams, t. y. įrašę $T_1=T_2$, $p_1=p_2$ arba $V_1=V_2$, gausime (5.2), (6.5) ir (6.6) formules.

Vieno dėsnio trys išraiškos

Jeigu Klapeirono lygtį taikome tokiam atvejui, kai viena iš dujų kraštinių būsenų yra normalioji, tai ją užrašome šitaip:

$$\frac{Vp}{T}=\frac{V_0 p_0}{T_0}; \qquad (7.3)$$

čia $p_0=101325$ Pa, $T_0=273$ K. Kai žinoma dujų masė m, tūrį V_0 apskaičiuojame kaip santykį $V_0=\frac{m}{\varrho_0}$; čia ϱ_0 — dujų tankis normaliosiomis sąlygomis.

Jeigu, nagrinėjame normaliosiomis sąlygomis konkretų dujų kiekį — vieną molį,— tai jos užima jau žinomą tūrį $V_0=V_{mol}=22{,}4\cdot10^{-3}$ m^3. Tuomet (7.3) lygties dešinė pusė bus nepriklausoma nuo dujų rūšies konstanta

$$\frac{p_0 V_{mol}}{T_0}=\frac{101\,325\ \text{Pa}\cdot 22{,}4\cdot10^{-3}\ \text{m}^3}{273\ \text{K}}=8{,}31\ \frac{\text{J}}{\text{K}}.$$

Ši konstanta, vienoda visoms dujoms, vadinama **universaliąja dujų konstanta** ir žymima raide R:

$$\frac{pV_{mol}}{T}=R. \qquad (7.4)$$

Pastarąją lygtį išplečiame bet kokiam medžiagos kiekiui ν:

$\frac{p\nu V_{mol}}{T}=\nu R$. Pakeitę $\nu=\frac{m}{M}$ ir $\nu V_{mol}=V$, gauname:

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R. \qquad (7.5)$$

Pastaroji dujų būsenos lygties išraiška vadinama *Klapeirono ir Mendelejevo lygtimi*.

§ 7.2. Temperatūros ryšys su dujų molekulių kinetine energija

Temperatūros formulė

§ 3.4 dėl žinių stokos temperatūrą galėjome apibrėžti tik kokybiškai ir gana abstrakčiai: *temperatūra yra kūno molekulių vidutinės kinetinės energijos matas*. Dabar, naudodamiesi žiniomis apie termodinaminius dujų parametrus ir jų tarpusavio ryšius, jau galime tą matą išreikšti kiekybiškai — išvesti formulę, siejančią minėtąją energiją ir temperatūrą. Į makroskopinę Klapeirono lygtį (7.4) įrašykime mikroskopinę slėgio išraišką iš Bernulio formulės (4.8). Gausime:

$$\frac{2}{3} n_0 \bar{E}_k \frac{V_{mol}}{T} = R.$$

Turėdami omenyje, kad $n_0 V_{mol} = N_A$ (§ 4.3), išreiškiame ieškomąją vidutinę molekulės kinetinę energiją:

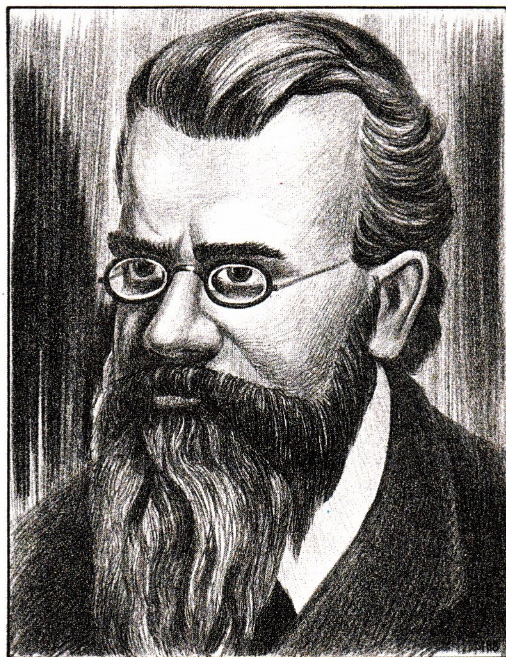
$$\bar{E}_k = \frac{3R}{2N_A} T. \qquad (7.6)$$

Viena iš svarbiausių konstantų

Formulėje esantis universaliosios dujų konstantos R ir Avogadro skaičiaus N_A santykis austrų fiziko Liudviko B o l c m a n o (1844—1906) nuopelnams pažymėti buvo pavadintas **Bolcmano konstanta** (k):

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8{,}31 \ \text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})}{6{,}023\cdot 10^{23} \ \text{mol}^{-1}} =$$

$$= 1{,}38\cdot 10^{-23} \ \frac{\text{J}}{\text{K}}. \qquad (7.7)$$



Liudvikas Bolcmanas (1844—1906)

Konstantos vienetas J/K atskleidžia jos fizikinę prasmę: *Bolcmano konstanta rodo, kiek vidutiniškai pasikeičia kiekvienos molekulės kinetinė energija, dujų temperatūrai pakitus vienu kelvinu.*

Dabar galime parašyti galutinę temperatūros ir kinetinės energijos ryšio formulę:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT. \qquad (7.8)$$

Remiantis šia lygtimi galima parodyti, kaip priklauso nuo temperatūros vidutinis kvadratinis dujų molekulių greitis:

$$\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT; \qquad \text{iš čia}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \qquad (7.9)$$

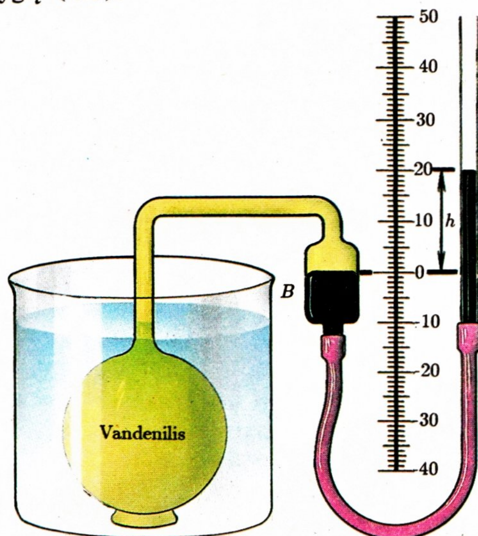
▲ **7.1.** Apskaičiuokite angliarūgštės dujų molekulių vidutinį kvadratinį greitį ir vidutinę visą kinetinę energiją 223 K temperatūroje.

Ar galima absoliuti rimtis?

Analizuodami (7.8) ir (7.9) formules, įsitikiname, kad, pasiekus $T = 0$, molekulių kinetinė energija, taigi ir jų chaotiško judėjimo greitis, lygūs nuliui. Ar tai reiškia, kad absoliutinio nulio temperatūroje išnyksta apskritai bet koks molekulių judėjimas? Ir teorija, ir bandymai įrodė, kad vis dėlto taip nėra. Žemų temperatūrų sąlygomis pradeda veikti kitokie (kvantiniai) dalelių judėjimo dėsniai, todėl gautų išvadų tiesiogiai taikyti negalime. Ir absoliutinio nulio temperatūroje sistema gali turėti nelygią nuliui judėjimo energiją.

Vietoj termometro — manometras

Naujai išvestą molekulių vidutinės kinetinės energijos išraišką (7.8) įrašykime į molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindinę lygtį (4.8):



7.3 pav.

$$p = \frac{2}{3} n_0 \cdot \frac{3}{2} kT;$$

iš čia

$$p = n_0 kT. \qquad (7.10)$$

Matome, kad dujų slėgis yra tiesiog proporcingas molekulių skaičiui tūrio vienete ir termodinaminei temperatūrai. Tuo pasinaudojus, kartais techniškai sudėtingą temperatūros matavimą galima pakeisti paprastesniu dujų slėgio matavimu. Tam yra skirtas **dujinis termometras** (7.3 pav.). Lyginant su vandenilinio termometro parodymais yra graduojami ir tikrinami įvairūs praktikoje vartojami termometrai.

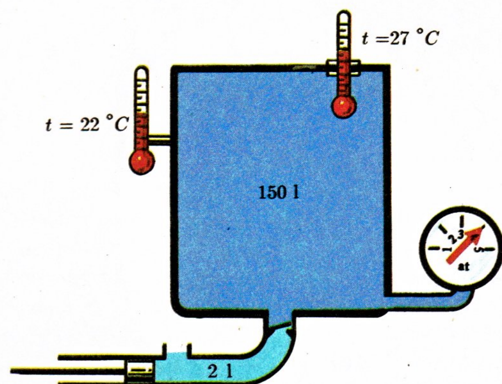
§ 7.3. Kaip spręsti uždavinius apie dujų būsenos kitimą

Algoritmas uždaviniams spręsti

Sprendžiant uždavinius, susijusius su dujų procesais, svarbiausia ir sunkiausia yra išskirti įvairiomis situacijomis dvi jų būsenas. Visų šio tipo uždavinių sprendimo eiga panaši. Prieš pradėdami spręsti įsigilinkite į uždavinio sąlygą, įsivaizduokite ir nupieškite aprašytąją fizikinę situaciją.

1. Apibūdinkite pirmą ir antrą dujų būsenas.
2. Išsiaiškinkite, kuri iš dujų būsenos lygčių (7.1), (7.3), (7.4), (7.5) geriausiai tinka uždavinyje aprašytoms būsenoms susieti.
3. Iš pasirinktosios dujų būsenos lygties išreikškite ieškomąjį dydį; tada išryškės, kokie duomenys reikalingi jam apskaičiuoti.
4. Raskite sąlygoje ir lentelėse reikiamus duomenis, surašykite juos stulpeliu ir išreikškite SI vienetais.
5. Įrašykite duomenis į ieškomojo dydžio išraišką ir apskaičiuokite.

Parašykite atsakymą. Patikrinkite jo prasmę pagal uždavinio sąlygą.



7.4 pav.

Pavyzdys. Slėgimo siurblys (7.4 pav.) kiekviena stūmoklio eiga įtraukia 2,0 l atmosferos slėgio ir 22 °C temperatūros oro. Tą orą siurblys varo į 0,15 m^3 talpos rezervuarą, kuris anksčiau buvo atviras. Po kelių siurblio eigų rezervuare susidarys 4,0 at slėgis, jei temperatūra pakils iki 27 °C?

Sprendimas. 1. Šiame uždavinyje aprašytos dvi dujų būsenos: pirma — 22 °C temperatūros dujos atmosferoje, antra — dujos suspaustos rezervuare.

2. Siurblio eigų skaičių n rasime, jei žinosime, koks oro tūris V_1 buvo suslėgtas. Užrašome (6.7) lygtį

$$\frac{V_1 p_1}{T_1} = \frac{V_2 p_2}{T_2}.$$

3. Išreiškiame ieškomąjį dydį:

$$V_1 = \frac{T_1 p_2 V_2}{T_2 p_1}.$$

4. Išrašome iš sąlygos reikiamus duomenis:

$T_1 = 22\ °C = (273 + 22)\ K = 295\ K$,
$p_2 = 4\ at = 4 \cdot 1{,}013 \cdot 10^5\ Pa$,
$V_2 = 0{,}15\ m^3$,
$T_2 = 27\ °C = (273 + 27)\ K = 300\ K$,
$p_1 = 1\ at = 1{,}013 \cdot 10^5\ Pa$.

5. Įrašome duomenis į V_1 išraišką ir apskaičiuojame:

$$V_1 = \frac{295 \cdot 0{,}15 \cdot 4 \cdot 1{,}013 \cdot 10^5}{1{,}013 \cdot 10^5 \cdot 300}\ m^3 =$$

$$= 0{,}59\ m^3 = 590\ l.$$

Viena stūmoklio eiga įtraukiama 2 l oro, taigi reikės $590 : 2 = 295$ eigų.

Ats. $n = 295$ eigos.

Klaidos ugdo atkaklumą

Teisingas šio uždavinio atsakymas: $n = 220$ (!). Kur, analizuojant uždavinio sąlygą ir surašant duomenis, įsivėlė fizikinė klaida? (Atidžiai išstudijuokite sąlygą ir brėžinį!)

7.2. Kokį slėgį sudaro deguonies dujos 103 °C temperatūroje, užimdamos 40,0 l tūrį, jeigu normaliosiomis sąlygomis jos užima 13,65 l? Kokia jų masė?

?

1. Išveskite Klapeirono lygtį, dujų būsenos kitimą išskaidydami į procesus a—g ir g—c (7.2 pav.).

2. Remdamiesi Bolcmano konstantos k fizikine prasme (§ 7.2), paaiškinkite universaliosios dujų konstantos R fizikinę prasmę.

3. Kaip pasikeis vidutinis kvadratinis molekulių greitis, absoliutinei temperatūrai padidėjus 3 kartus?

4. Pagalvokite, kaip matuojama temperatūra dujiniu termometru (7.3 pav.).

5. Parodykite 7.4 paveiksle, kur yra oro tūris 2 l.

6. Koks netikslumas yra 7.4 paveiksle?

7.3. Kai slėgis lygus $7{,}2 \cdot 10^5$ Pa ir temperatūra 288 K, dujos užima 0,60 m^3 tūrį. Kokioje temperatūroje tos dujos užims 1,6 m^3 tūrį, sudarydamos $2{,}25 \cdot 10^5$ Pa slėgį?

7.4. Laboratorinio žibalinio degiklio siurbliukas įsiurbia vienu kartu 35 cm^3 oro. Rezervuare virš žibalo yra 0,45 l laisvas tūris. Koks slėgis bus jame po 20 siurbimų, jeigu temperatūra tuomet pakils nuo 286 iki 325 K?

1.3 skyrius

TERMODINAMIKA

„Arčiau įsistebėję į tuos apsireiškimus matome, jog nekuriam darbui pragaišus, atsiranda šiluma. Tad, ir atžagariai, turime tiesą manyti, jog šiluma darbą duoda“.

Iš pirmojo lietuviško fizikos vadovėlio

8 paskaita

VISUOTINIO GAMTOS DĖSNIO ATRADIMAS

§ 8.1. Termodinamikos objektas

1.2 skyriuje, naudodamiesi termodinaminiais parametrais, aprašėme dujų būsenos kitimus — *termodinaminius dujų procesus,* nepaaiškinę paties termodinamikos termino. *Fizikos dalis, tirianti šiluminius reiškinius ir vidinės energijos virsmo kitų formų energija dėsnius, vadinama* **termodinamika** (gr. *thermos* — šiltas, *dynamis* — jėga). Termodinaminiai metodai yra universalūs — jais galima tirti ne vien dujas, bet ir bet kokį kompleksą, sudarytą iš tarpusavyje susijusių elementų, vadinamą **termodinamine sistema.** Praktiniu požiūriu labai svarbi termodinaminė sistema yra šiluminė mašina.

Termodinamikoje nekreipiama dėmesio į medžiagos, sudarančios sistemą, vidinę sandarą, operuojama tik tokiais dydžiais, kuriuos galima tiesiogiai išmatuoti — slėgiu, tūriu, mase, temperatūra ir kt.

§ 8.2. Kūno vidinės energijos perdavimas

Trys šilumos perdavimo būdai

To paties kūno dalys, kūnas ir aplinka, atskiri kūnai gali perduoti vienas kitam vidinę energiją, jeigu jų temperatūra yra skirtinga. Tokį procesą vadiname **šilumos perdavimu** (§ 3.4). Vykstant šilumos perdavimui, vienos formos energija nevirsta kitos formos energija, tik dalis karštesnio kūno vidinės energijos perduodama šaltesniam kūnui. Energija, perduota kūnui šilumos perdavimo būdu, vadinama **šilumos kiekiu** (žymima Q). Šilumos kiekio, kaip ir mechaninės energijos, SI vienetas yra džaulis (J). Gana paplitęs nesisteminis vienetas kalorija (cal); 1 cal = 4,19 J.

Jeigu perduodant šilumą pati medžiaga neslenka iš vienos kūno dalies į kitą, arba iš vieno kūno į kitą, tai toks šilumos perdavimo būdas vadinamas **šilumos laidumu.** Jo esmė šitokia: susiduriant greičiau judančioms šiltesnio kūno molekulėms su lėčiau judančiomis šaltesnio kūno molekulėmis, dalis pirmųjų energijos perduodama antrosioms. Geriausi šilumos laidininkai yra metalai. Dauguma skysčių blogai praleidžia šilumą, jos beveik nepraleidžia dujos.

Kaitinant dujas ar skysčius, įšilę sluoksniai plečiasi, lengvėja ir kyla į viršų — juos išstumia ir prie šilumos šaltinio priartėja šaltesni tankesni sluoksniai. Vyksta mechaninis šiltų ir šaltų sluoksnių maišymasis — **konvekcija.** Dėl konvekcijos pučia vėjas, susidaro trauka ir cirkuliacija.

Stovėdami prie degančio laužo jaučiame karštį, nors nei konvekcija, nei šilumos laidumu to negalime paaiškinti. Tai dar vienas šilumos perdavimo būdas — **spinduliavimas.** Spinduliavimu energija perduodama kūnams nesiliečiant. Spinduliuoja ne vien labai įkaitę kūnai: kiekvienas kūnas, kurio temperatūra aukštesnė už absoliutinį nulį, spinduliuoja savo vi-

dinės energijos sąskaita. Spinduliuojant energiją perneša ne molekulės ar atomai, o ypatingos materijos dalelės, vadinamos **fotonais** (§ 48.3). Jas skleidžia vienas, o sugeria kitas kūnas, todėl spinduliavimu energija gali būti perduodama ir per vakuumą. Kuo kūnas karštesnis, tuo intensyviau jis spinduliuoja.

§ 8.3. Energijos tvermės dėsnis mechaniniuose ir šiluminiuose procesuose

Kaip be ugnies sušildyti vandenį

Fizikai ilgai sprendė mįslę — iš kur atsiranda šiluma gręžiant medį, kalant geležį, slegiant dujas arba kitaip atliekant mechaninį darbą?

1798 m. anglų inžinierius Bendžaminas R u m f o r d a s įrodė, kad mechaninio darbo sąskaita galima gauti neribotą šilumos kiekį. Rumfordas tvirtino, kad šiluma, atsiradusi gręžiant metalą, tai nėra energija, glūdėjusi metalo luite ir išsilaisvinusi jam sutrupant į drožles — šiluma atsiranda dėl paties mechaninio darbo. Taigi *kūnų vidinė energija gali kisti ne vien dėl šilumos perdavimo, bet ir dėl atliekamo mechaninio darbo.*

1843 m. anglų fizikas Džeimsas D ž a u l i s (1818—1889) nustatė, kad tokiam pat šilumos kiekiui gauti visuomet suvartojamas toks pat mechaninės energijos kiekis.

Džaulio vardu buvo pavadintas darbo, energijos ir šilumos kiekio SI vienetas.

Energijos tvermė — visuotinis gamtos dėsnis

Jau anksčiau žinotas mechanikoje energijos tvermės dėsnis buvo išplėstas šiluminiams, o kiek vėliau ir visiems kitiems gamtos reiškiniams. Taigi *energija gamtoje neišnyksta ir neatsiranda iš nieko, tik vieni kūnai perduoda energiją kitiems arba vienokios formos energija virsta kitokios formos energija.* Energijos tvermės dėsnis apima visus gamtos reiškinius. Juo remiantis tikrinamos naujos teorijos ir įvertinami bandymų rezultatai.

§ 8.4. Šilumos balansas

Šilumos buhalterija

Jeigu kūnų vidinė energija kinta tik dėl šilumos perdavimo (darbo neatliekama), tai energijos tvermės dėsnį galima užrašyti lygtimi

$$\Sigma Q_{atiduotas} = \Sigma Q_{gautas}. \qquad (8.1)$$

Ši energijos tvermės dėsnio šiluminiuose procesuose matematinė išraiška vadinama **šilumos balanso lygtimi:** *visas vienų kūnų atiduotas šilumos kiekis yra lygus visam kitų kūnų gautam šilumos kiekiui.*

Taigi universalios formulės, tinkamos visiems šilumos perdavimo uždaviniams spręsti, nėra. Kiekvienam uždaviniui balansas bus išreiškiamas skirtingai, žiūrint kiek kūnų dalyvauja šilumos apykaitoje ir kokie procesai juose vyksta.

Šilumos kiekis, kurį suvartoja šylantis arba išskiria vėstantis kūnas, apskaičiuojamas pagal žinomą iš ankstesnio kurso formulę

$$Q = mc\Delta t; \qquad (8.2)$$

čia Q — šilumos kiekis J, m — kūno masė kg, c — medžiagos specifinė šiluma J/(kg·K) (II lentelė), t — temperatūros skirtumo absoliutinė vertė K.

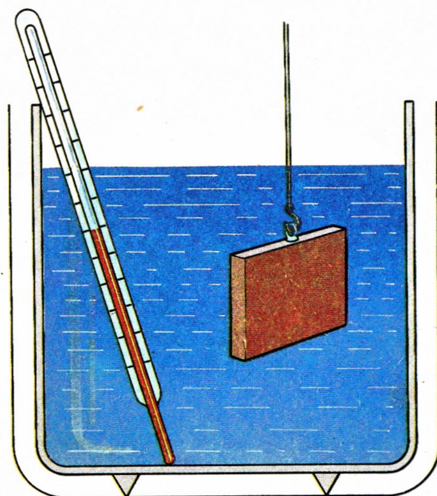
Algoritmas uždaviniams spręsti

Visus su šilumos perdavimu susijusius uždavinius lengva spręsti šilumos balanso metodu pagal universalų algoritmą.

Prieš pradėdami spręsti keletą kartų atidžiai išnagrinėkite uždavinio sąlygą, įsi-

vaizduokite ir nupieškite* uždavinyje aprašytą fizikinę situaciją.

1. Išsiaiškinkite, kokie kūnai dalyvauja šilumos apykaitoje ir kokie šilumos kiekiai sudaro balansą. Patartina nubraižyti šilumos perdavimo grafiką.
2. Kiekvieną šilumos kiekį pažymėję indeksu 1, 2, 3, ..., parašykite jų formules ir jas paaiškinkite.
3. Sudarykite šilumos balanso lygtį.
4. Įrašykite į balanso lygtį šilumos kiekių išraiškas.
5. Iš balanso lygties išreikškite ieškomąjį dydį; tada paaiškės skaičiavimui reikalingi duomenys.
6. Sąlygoje ir lentelėse suieškokite reikiamus duomenis, surašykite stulpeliu ir išreikškite SI vienetais.
7. Įrašykite duomenis į ieškomo dydžio išraišką ir apskaičiuokite.
8. Parašykite atsakymą. Patikrinkite, ar savo prasme jis atitinka uždavinio sąlygą. Palyginkite su atsakymu, duotu uždavinyne.



8.1 pav.

Pavyzdys. 0,30 kg masės plokštelė įkaitinama iki 85 °C ir įleidžiama į 0,030 kg masės aliumininį kalorimetrą su 0,25 kg vandens, kurio temperatūra 22 °C. Kalorimetre nusistovi 28 °C temperatūra. Apskaičiuokite plokštelės medžiagos specifinę šilumą.

S p r e n d i m a s. 1. Nupiešę ir išanalizavę aprašytąjį bandymą (8.1 pav.), įsitikiname, kad šiame uždavinyje balansą sudaro trys šilumos kiekiai (8.2 pav.).

2. Šilumos kiekis, kurį *atidavė* plokštelė ataušdama nuo

85 °C iki 28 °C ($\Delta t_1 = 57$ °C),

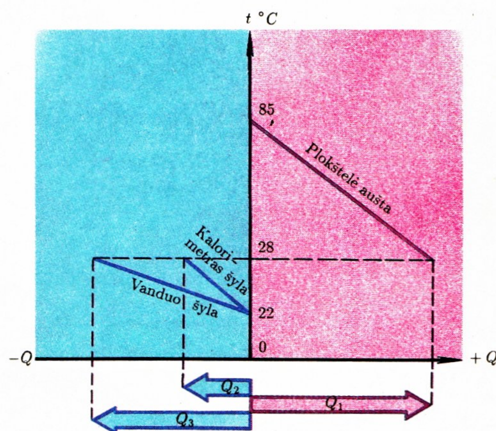
$Q_1 = m_1 c_1 \Delta t_1$;

šilumos kiekis, kurį *gavo* kalorimetras, įšildamas nuo

22 °C iki 28 °C ($\Delta t_2 = 6$ °C),

$$Q = m_2 c_2 \Delta t_2;$$

šilumos kiekis, kurį *gavo* vanduo, įšildamas nuo 22 °C iki 28 °C ($\Delta t_3 = \Delta t_2$),



8.2 pav.

$$Q_3 = m_3 c_3 \Delta t_3.$$

3. Sudarome šilumos balanso lygtį:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

4. Įrašome šilumos kiekių išraiškas:

$$m_1 c_1 \Delta t_1 = m_2 c_2 \Delta t_2 + m_3 c_3 \Delta t_3.$$

5. Išreiškiame ieškomąjį dydį c_1:

$$c_1 = \frac{m_2 c_2 \Delta t_2 + m_3 c_3 \Delta t_3}{m_1 \Delta t_1}.$$

---

* Tai dažnai labai praverčia, kaip ir schema uždaviniui apie elektros srovę ar brėžinys geometrijos uždaviniui. Dažnai klaidų priežastis būna blogai įsivaizduota uždavinio fizikinė situacija.

6. Sąlygoje ir lentelėse suieškome reikiamus duomenis:

$m_2 = 0{,}3$ kg,
$c_2 = 9{,}2 \cdot 10^2$ J/(kg·K), (II lent.)
$m_3 = 0{,}25$ kg,
$c_3 = 4{,}2 \cdot 10^3$ J/(kg·K), (II lent.)
$m_1 = 0{,}3$ kg.

7. Įrašome duomenis į ieškomojo dydžio išraišką ir apskaičiuojame:

$$c_1 = \frac{0{,}3 \cdot 9{,}2 \cdot 10^2 \cdot 6 + 0{,}25 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 6}{0{,}3 \cdot 57} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 380 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

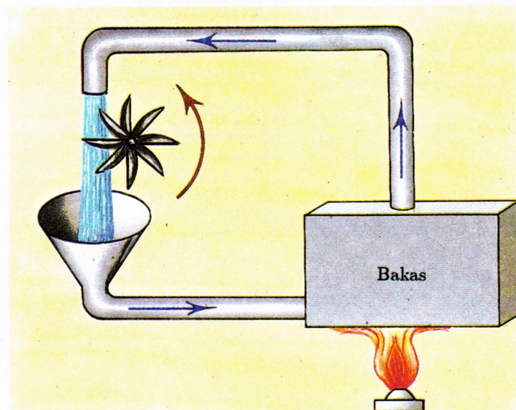
Ats. $c_1 = 380$ J/(kg·K).

8.1. Kodėl dykumose temperatūra dieną labai pakyla, o naktį nukrinta net žemiau nulio?

? *1. Kodėl šūvio metu neišsilydo patrankos vamzdis, nors dujų temperatūra vamzdyje siekia 3600 °C, o plieno lydymosi temperatūra 1400 °C?*
2. Kaip termodinamika aiškina dujų slėgį?

8.2. Į 50 g masės stiklinę kolbą su 185 g vandens, kurio temperatūra 20 °C, įpilta gyvsidabrio, įkaitinto iki 100 °C; dėl to vanduo sušilo iki 22 °C. Kokia įpilto gyvsidabrio masė?

8.3. Kokia nusistovės temperatūra, sumaišius 6 kg 42 °C, 4 kg 72 °C ir 20 kg 18 °C temperatūros vandens?



8.3 pav.

Simas Klaidelė išrado „konvekcinę" šiluminę mašiną (8.3 pav.). Šildomas vanduo kyla aukštyn ir krinta ant turbinos menčių.
Kodėl jo projektas buvo atmestas?

---

9 paskaita

NAUJAS ENERGIJOS TVERMĖS DĖSNIO VARIANTAS

§ 9.1. Pirmasis termodinamikos dėsnis

Energijos tvermės dėsnis (žr. § 8.3), apimantis mechaninius ir šiluminius reiškinius, vadinamas **pirmuoju termodinamikos dėsniu.**

Jeigu termodinaminė sistema nėra izoliuota, t. y. gauna arba atiduoda šilumą, atlieka darbą prieš išorines jėgas arba išorinės jėgos atlieka darbą sistemos atžvilgiu, tai dėl to kinta sistemos vidinė energija. Pirmasis termodinamikos dėsnis teigia: *termodinaminės sistemos vidinės energijos pokytis ΔU yra lygus gauto šilumos kiekio Q ir išorinių jėgų darbo A sumai:*

$$\Delta U = Q + A. \qquad (9.1)$$

Vidinės energijos pokytis ΔU yra teigiamas, jeigu ji didėja, ir neigiamas, jeigu mažėja. Taip pat neigiama yra darbo A vertė, jeigu jį atlieka ne išorinės jėgos sistemos atžvilgiu, o pati sistema prieš išorines jėgas; ir, pagaliau, šilumos kiekis Q yra neigiamas, jeigu sistema ne gauna, o atiduoda šilumą.

Energijos tvermės dėsnis, kaip jau esame kalbėję, yra visuotinis gamtos dėsnis, kuriam paklūsta visi joje vykstantys procesai. Todėl vėliau, mokydamiesi kitus fizikos skyrius, panašias į (9.1) lygtis sudarysime ir elektriniams, optiniams, branduoliniams bei kitokiems procesams.

Trys daliniai atvejai

Pritaikysime pirmąjį termodinamikos dėsnį *dujų izoprocesams.*

Vykstant **izobariniam procesui,** šildomos dujos plečiasi (5.3 pav.), taigi atlieka darbą. Be to, didėja jų temperatūra — didėja vidinė energija. Todėl pagal pirmąjį termodinamikos principą, gautas šilumos kiekis Q suvartojamas darbui atlikti (darbas šiuo atveju yra neigiamas) ir vidinei energijai padidinti:

$$Q = \Delta U - A.$$

Vykstant **izochoriniam procesui** (6.1 pav.), dujos plėstis negali, todėl darbo neatlieka: $A = 0$. Visa gautoji šiluma tik kelia temperatūrą — didina vidinę energiją:

$$\Delta U = Q.$$

Taigi dujoms šildyti izochoriškai pakanka mažiau šilumos, negu izobariškai.

Vykstant **izoterminiam procesui** (5.1 pav.), idealiųjų dujų temperatūra, taigi ir vidinė energija, nekinta: $\Delta U = 0$, vadinasi, (9.1) lygybę turime užrašyti:

$$Q = -A.$$

Tai nereiškia, kad gali veikti tokia šiluminė mašina, kurios naudingumo koeficientas lygus 100%. Šia lygybe tik konstatuojame faktą, kad, *norint palaikyti izoterminį procesą, būtina teikti šilumos kiekį, lygų dujų atliktam darbui.*

§ 9.2. Adiabatinis procesas

Žinoma, kad staigiai suslegiamos dujos įkaista, o staigiai besiplėsdamos ataušta. Kaip tai paaiškinti remiantis pirmuoju termodinamikos dėsniu? Jeigu procesas įvyksta labai greitai, dujos per tą laiką nespėja nei gauti, nei atiduoti šilumos: $Q = 0$. Toks procesas vadinamas **adiabatiniu** (gr. *adiabatos* — nepereinamas). Pirmąjį termodinamikos principą šiuo atveju galima užrašyti šitaip:

$$\Delta U = A. \quad (9.2)$$

Tai reiškia, kad *adiabatiškai besiplėsdamos dujos atlieka darbą prieš išorines jėgas vien savo vidinės energijos sąskaita.*

Adiabatiškai besiplečiančių dujų atšalimas panaudojamas dujų skystinimo mašinose. Atvirkščias reiškinys — staigiai slegiamų dujų įkaitimas — taikomas dyzeliniuose varikliuose degiam mišiniui uždegti. Dirbant galingiems kompresoriams, slegiamų dujų įkaitimas yra nepageidautinas, todėl tenka naudoti specialią suslėgto oro rezervuarų aušinimo sistemą.

§ 9.3. Dujų darbas

Dujos yra tarsi natūralus gamtinis akumuliatorius, galintis energiją kaupti, jai virstant vidine energija, ir vėl grąžinti atliekant darbą. Adiabatiškai slegiant arba šildant dujas, jų vidinė energija didėja. Adiabatiškai besiplėsdamos dujos atlieka darbą prieš išorines jėgas, jų vidinė energija mažėja — temperatūra krinta.

Išvesime formulę dujų atliekamam darbui apskaičiuoti. Įsivaizduokime dujas, uždarytas cilindre su laisvai slankiojančiu stūmokliu (9.1 pav., *a*). Sakykime, jos plečiasi veikdamos stūmoklį jėga

$$F = pS; \quad (9.3)$$

čia S — stūmoklio skerspjūvio plotas.

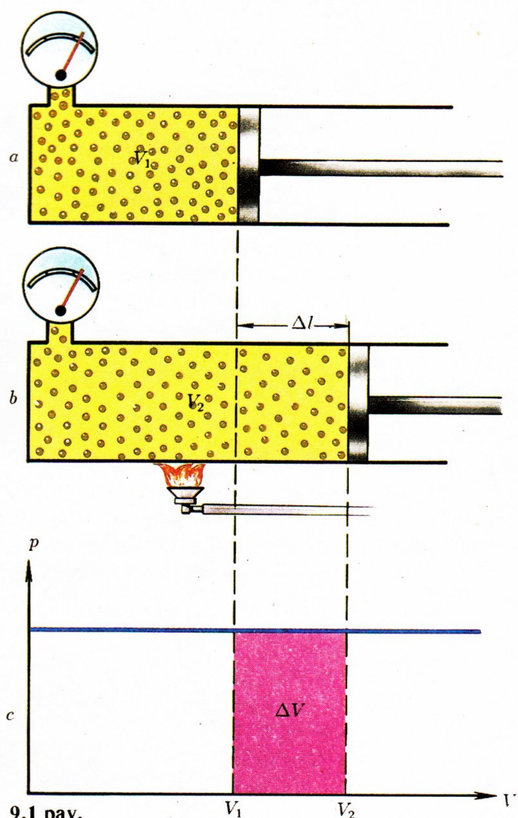
Jeigu dujų slėgis p nekinta, tai, stūmokliui paslinkus atstumu Δl (9.1 pav., *b*), atlikto darbo absoliutinė vertė (pagal mechanikos formulę) yra lygi

$$A = F\Delta l \text{ arba } A = pS\Delta l.$$

Tačiau $S\Delta l$ yra dujų tūrio pokytis ΔV, todėl galutinai galime parašyti:

$$A = p\Delta V. \quad (9.4)$$

Matome, kad dujos atlieka darbą tik tada, kai kinta jų tūris. Jeigu darbą atlieka išorinės jėgos — dujos suslegiamos, jų tūris



9.1 pav.

mažėja, tai pačių dujų darbas yra neigiamas.

Nubraižius dujų proceso grafiką *pV* koordinačių sistemoje (9.1 pav., *c*), dujų atliktas darbas savo skaitine verte yra lygus grafiko ribojamos figūros plotui (paveiksle tas plotas nuspalvintas).

Pneumatinis pistoletas ir kitkas

Prietaisai ir įrengimai, kurie veikia varomi suspausto oro, vadinami **pneumatiniais.** Tai pramonėje naudojami presai, vibratoriai, transporteriai, audimo staklių šaudyklės ir kt. Transporto priemonėse suspaustas oras varsto duris, nuspaudžia stabdžius. Pneumatiniais mikrovarikliais valdomi orbitoje kosminiai laivai. Pastaruoju metu įvairiose šalyse projektuojamos ir statomos pneumoakumuliatorinės elektrinės. Jos naktį, kai yra elektros perteklius, kaupia energiją — suslegia orą milžiniškuose rezervuaruose. Suslėgto oro energija vėl paverčiama elektros energija, kai jos trūksta.

§ 9.4. Energijos balansas

Jau mokėmės sudaryti šilumos balanso lygtį, t. y. energijos balanso lygtį įvairiomis situacijomis, kai *vieni kūnai perduoda energiją kitiems.* Dabar nagrinėsime situacijas, kai vienokios formos energija virsta kitokios formos energija. Kai mechaninė energija virsta kūno vidine energija, išorinėms jėgoms atliekant darbą *A*, energijos balansas išreiškiamas lygtimi

$$A = \Delta U. \qquad (9.5)$$

Tai — pirmojo termodinamikos dėsnio (9.1) dalinis atvejis, kai nėra šilumos apykaitos ($Q = 0$).

Jeigu dalis energijos išsisklaido aplinkoje, (9.5) lygtyje reikia įvesti naudingumo koeficiento pataisą:

$$\eta A = \Delta U. \qquad (9.6)$$

Lygtyse esantis mechaninis darbas dažniausiai apskaičiuojamas pagal vieną iš žinomų iš mechanikos formulių:

$$A = E_p = mgh \qquad (9.7)$$

— kai, atliekant darbą, kinta potencinė energija;

$$A = E_k = \frac{mv^2}{2} \qquad (9.8)$$

— kai, atliekant darbą, kinta kinetinė energija;

$$A = F_{tr}s = kmgs \qquad (9.9)$$

— kai darbą atlieka trinties jėga.

Algoritmas uždaviniams spręsti

Šio tipo uždaviniai sprendžiami tokia pat tvarka, kaip ir šilumos balanso uždaviniai. Ir šiuo atveju, atidžiai perskaičius uždavinio sąlygą ir išanalizavus aprašytą fizikinę situaciją, pravartu ją atvaizduoti piešinyje.

1. Nustatykite, koks fizikinis procesas aprašomas sąlygoje, ir sudarykite jam energijos balanso lygtį.
2. Parašykite lygties narių formules.
3. Įrašykite į balanso lygtį jos narių išraiškas.
4. Išspręskite lygtį, t. y. išreikškite ieškomąjį dydį.
5. Išrašykite iš sąlygos ir lentelių reikiamus duomenis ir išreikškite juos SI vienetais.
6. Įrašykite duomenis į ieškomo dydžio išraišką ir apskaičiuokite.

Pasvarstykite, ar atsakymas savo prasme atitinka uždavinio sąlygą.

Vadovaujantis šiuo algoritmu sprendžiami uždavinynuose pateikti tipiniai uždaviniai.

Pavyzdys. 12,5 t masės tramvajaus vagonas, važiavęs 28,8 km/h greičiu, įjungus stabdžius sustojo. Kiek įšilo aštuonios ketaus vagono stabdžių trinkelės, kurių kiekvienos masė 9,0 kg, jeigu jų įšilimui teko 60% vagono kinetinės energijos?

S p r e n d i m a s. 1. Aprašytoje situacijoje dalis vagono kinetinės energijos virsta stabdžių trinkelių vidine energija, todėl

$$\eta A = \Delta U.$$

2. $A = E_k = \dfrac{m_1 v^2}{2}$ — vagono kinetinė energija,

o apie trinkelių vidinės energijos pokytį galima spręsti iš jų įšilimo: $\Delta U = Q = m_2 c \Delta t$.

3. Šias išraiškas įrašome į balanso lygtį

$$\eta \frac{m_1 v^2}{2} = m_2 c \Delta t.$$

4. Išreiškiame ieškomąjį dydį:

$$\Delta t = \frac{\eta m_1 v}{2 \cdot m_2 c}.$$

5. Sąlygoje ir lentelėse suieškome reikiamus duomenis:

$\eta = 60\% = 0{,}6$,
$m_1 = 12{,}5$ t $= 12{,}5 \cdot 10^3$ kg,
$v = 28{,}8$ km/h $= 8$ m/s,
$m_2 = 8 \cdot 9 = 72$ kg,
$c = 5{,}5 \cdot 10^2$ J/(kg·K). (II lent.).

6. Įrašome duomenis į ieškomojo dydžio išraišką ir apskaičiuojame:

$$\Delta t = \frac{0{,}6 \cdot 12{,}5 \cdot 10^3 \cdot 64}{2 \cdot 72 \cdot 5{,}5 \cdot 10^2} \text{ K} = 6 \text{ K}.$$

Ats. $\Delta t = 6$ K.

▲ **9.1.** Vanduo krinta iš 1200 m aukščio. Kiek dėl to pakyla jo temperatūra, jeigu šildymui tenka 60% sunkio jėgos darbo?

▲ **9.2.** Kiek vandens galima įkaitinti nuo 288 K iki virimo dujų degikliu, kurio n. k. 40%, sudeginant 100 l gamtinių dujų?

? *1. Remdamiesi pirmuoju termodinamikos dėsniu, įrodykite, kad negalima sukurti amžinojo variklio.*
2. Pritaikykite pirmąjį termodinamikos principą elektros variklio darbui.
3. Kodėl taip mažai įkaito stabdžių kaladėlės pavyzdyje nagrinėtoje situacijoje?
4. Ar ataušta dujos, adiabatiškai besiplėsdamos į tuštumą? Kodėl?

■ **9.3.** Kiek įšyla štampavimo metu 1,5 kg masės plieno gabalas, jeigu į jį smogia 3920 N sveriantis kūjis, judantis 7,0 m/s greičiu, o plieno įšilimui tenka 60% kūjo energijos?

■ **9.4.** Per kiek laiko 1,55 l vandens įkais nuo 293 iki 373 K, jeigu degiklis vartoja 0,30 kg spirito per valandą, o jo n. k. 24%?

10 paskaita

SUDUŽUSIOS SVAJONĖS APIE AMŽINĄJĮ VARIKLĮ

„Gigantiškame gamtos procesų fabrike antrasis termodinamikos principas užima direktoriaus vietą — jis skirsto gamtos išteklius ir tvirtina sutartis, o energijos tvermės dėsniui tenka buhalterio vaidmuo — jis tik subalansuoja debitą ir kreditą".

Anglų fizikas R. E m d e n a s

§ 10.1. Antrasis termodinamikos principas

Grįžtamieji ir negrįžtamieji procesai

Nagrinėdami energijos tvermės dėsnį dviem atvejais — kai vieni kūnai perduoda energiją kitiems ir kai kinta energijos forma, nustatėme tik kiekybinį ryšį tarp energijos pokyčių. Tačiau šis dėsnis nenurodo, kuria kryptimi procesai gali ar negali vykti. Nei energijos tvermės dėsnis, nei pirmasis termodinamikos dėsnis neprieštarauja, kad šiluma būtų perduodama iš šaltesnio kūno šiltesniam. O Gamta prieštarauja. Ji prieštarauja ir tam, kad gulintis ant dirvono akmuo pats pakiltų aukštyn savo vidinės energijos sąskaita. Vadinasi, proceso krypties nurodymai reikalingi — pavyzdžiui, reikia nurodyti, kuria kryptimi perduodama šiluma. Todėl fizikoje įvedamos **grįžtamųjų** ir **negrįžtamųjų** procesų sąvokos. Negrįžtamaisiais vadinami tokie procesai, kurie priešinga kryptimi savaime nevyksta: kad jie vyktų priešinga kryptimi, būtinas pašalinis poveikis. Pavyzdžiui, dujos plečiasi savaime, o susispaudžia tik veikiamos pašalinės jėgos, taigi plėtimasis yra negrįžtamas procesas.

Gamtoje šiluma pati savaime sklinda tik iš karštesnių kūnų į šaltesnius, ir jokiomis aplinkybėmis vidinė energija negali savaime virsti to kūno mechanine energija. Kitaip sakant, *šilumos perdavimas iš karštesnių kūnų į šaltesnius ir kūno judėjimo energijos virsmas vidine energija yra negrįžtamieji procesai.* Tai yra **antrasis termodinamikos dėsnis.** 1850 m. jį suformulavo vokiečių mokslininkas Rudolfas K l a u z i j u s (1822—1888).

Vėl nesėkmė

Antrasis termodinamikos dėsnis paneigė galimybę sukurti mašiną, kuri imtų šilumą iš bet kokios temperatūros kūnų ir visą ją suvartotų darbui, dalies neatiduodama žemesnės temperatūros kūnui, t. y. negalima sukurti *antrosios rūšies amžinąjį variklį.* Taip buvo atmesta fantastinė idėja aprūpinti žemės gyventojus energija vartojant neišsemiamas vandenynų vidinės energijos atsargas.

§ 10.2. Šiluminių variklių veikimo principas

Technikos pažanga priklauso nuo sugebėjimo geriau panaudoti įvairių rūšių kuro cheminės energijos išteklius. Kuru vadiname kietąsias, skystąsias arba dujines degias medžiagas, vartojamas šilumai gauti. Šiuo metu kuras yra pagrindinis energijos šaltinis pramonėje, transporte ir buityje. Tačiau visos deginamos kaip kuras organinės medžiagos yra ir vertinga žaliava chemijos, popieriaus ir kitai pramonei, todėl pastaruoju metu vis labiau plečiamas branduolinio kuro vartojimas — atominė energetika.

Svarbiausias kuro kokybės rodiklis yra **degimo šiluma.** *Degimo šiluma q vadinamas šilumos kiekis, išsiskiriantis visiškai sudegus 1 kg kuro.* Jos vienetas yra J/kg. Sudegus m kg kuro, išsiskiria šilumos kiekis

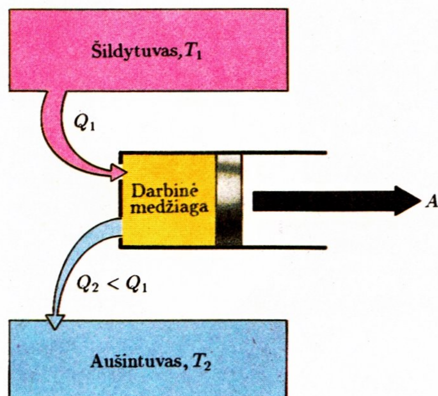
$$Q_k = mq. \tag{10.1}$$

Svarbiausių rūšių kuro degimo šilumos pateiktos III lentelėje.

Šiluminis variklis ir jo dalys

Mašinos, kuriose vidinė kuro energija virsta mechanine energija, vadinamos šiluminiais varikliais. Šiluminiai varikliai yra garo mašina, garo ir dujų turbina, vidaus degimo variklis, reaktyvus variklis. Visų variklių konstruktoriams keliamas tas pats uždavinys — *kuo našiau vidinę kuro energiją paversti mechanine.* Visų rūšių šiluminiuose varikliuose galime išskirti šias pagrindines dalis: **šildytuvą, aušintuvą** ir **darbinį mechanizmą,** kuriame **darbinė medžiaga** (dujos arba garas) atlieka darbą (10.1 pav.).

Šildytuvas gali būti garo katilas arba degimo kamera. Šildytuve degant kurui arba vykstant branduolinei reakcijai, darbinė medžiaga įkaitinama iki aukštos temperatūros T_1. Besiplėsdama darbinė medžiaga suka turbiną arba stumia stūmoklį — varo darbinį mechanizmą. Atidirbusi darbinė medžiaga išmetama į aušintuvą. Juo gali būti specialus įrenginys atidirbusiam garui aušinti ir kondensuoti — **kondensatorius** arba tiesiog atmosferos oras, kaip vidaus degimo variklyje. Darbinė medžiaga išneša į aušintuvą ir tam tikrą šilumos kiekį.



10.1 pav.

§ 10.3. Šiluminių variklių naudingumo koeficientas

Nelinksmas balansas

Ne visa energija, išsiskyrusi sudegus kurui, suvartojama taip, kaip mes pageidaujame, t. y. naudingai — virsta variklio mechanine energija.

Dalis energijos prarandama mašinų korpusams ir aplinkai šildyti, išmetama su dūmais ir kitomis degimo atliekomis, atiduodama variklio aušintuvui.

Naudingai suvartoto šilumos kiekio Q_{naud} santykis su visu kurui degant išsiskyrusiu šilumos kiekiu Q_k vadinamas variklio **naudingumo koeficientu** (žymimas n. k. arba η):

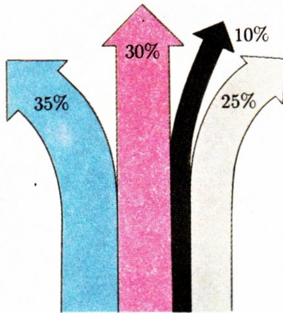
$$\eta = Q_{naud}/Q_k. \qquad (10.2)$$

Dirbant varikliui, naudinga laikoma ta šilumos kiekio dalis, kuri virsta mechanine energija: $Q_{naud} = A_{mech}$. Atsižvelgę į tai, kad praktikoje naudingumo koeficientas dažniau išreiškiamas ne vieneto dalimis, o procentais, gauname išraišką

$$\eta = \frac{A_{mech}}{Q_k} \cdot 100\%. \qquad (10.3)$$

Šiuolaikinių šiluminių variklių naudingumo koeficientas siekia 30—40%. Taigi apie 60% sudeginto varikliuose kuro tik šildo ir teršia aplinką. 10.2 paveiksle parodytas vidaus degimo variklio energijos balansas.

Mokslininkai ir konstruktoriai nuolat ieško būdų, kaip padidinti šiluminių variklių naudingumo koeficientą.



10.2 pav. 35 % kuro energijos atiduodama aušinimo skysčiui, 25 % — prarandama su išmetamomis dujomis, 10 % — nuostoliai dėl trinties, 30 % — naudingas darbas

Maksimalus naudingumo koeficientas

Prancūzų inžinierius ir fizikas Sadis K a r n o (1796—1832) nustatė, kad panašiai, kaip krintančio vandens darbas priklauso nuo aukščių skirtumo, taip ir bet kokios šiluminės mašinos darbas priklauso nuo šildytuvo temperatūros T_1 ir aušintuvo temperatūros T_2 skirtumo (10.1 pav.).

S. Karno įrodė, kad jokios šiluminės mašinos naudingumo koeficientas negali būti didesnis už santykį

$$\eta_{max}=\frac{T_1-T_2}{T_1}. \qquad (10.4)$$

Ši formulė rodo, kad n. k. yra tuo didesnis, kuo aukštesnė šildytuvo ir kuo žemesnė aušintuvo temperatūra.

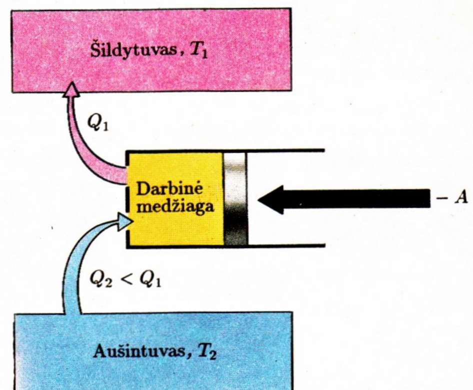
Tokia n. k. vertė būtų, jei pavyktų visai išvengti nuostolių dėl šilumos laidumo, trinties, ne visiško kuro sudegimo ir kt. Taigi tobulinant šiluminius variklius — mažinant pastaruosius nuostolius, n. k. gali artėti tik prie apskaičiuotos pagal (10.4) formulę vertės, o ne prie 100%. Svarbiausias kelias naudingumo koeficientui didinti — sudaryti kuo didesnį šildytuvo ir aušintuvo temperatūrų skirtumą.

§ 10.4. Šaldymo įrenginiai

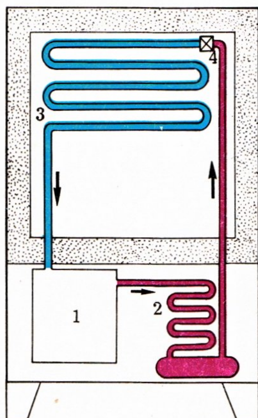
Galima sudaryti sąlygas ir šiluminei mašinai veikti atvirkščiai — imti šilumą iš aušintuvo ir perduoti ją šildytuvui. Tokią mašiną turi varyti išorinės jėgos, ir tai yra jau ne šiluminis variklis, o **šaldymo įrenginys** (10.3 pav.). Jo veikimas neprieštarauja antrajam termodinamikos dėsniui: šiluma jame pereina iš šaltesnio kūno į šiltesnį ne savaime, o eikvojant išorinių šaltinių energiją. Taigi *šaldymo įrenginys — tai mašina, kuri ima šilumą iš šaltesnio kūno ir atiduoda šiltesniam.* Taip šaldymo kameroje palaikoma žemesnė negu aplinkoje temperatūra.

Šaldytuvo veikimas

Buitiniuose šaldytuvuose (10.4 pav.) kaip darbinė medžiaga vartojami sparčiai garuojantys žemos virimo temperatūros skysčiai — freonas, amoniakas ir kiti. Jie vadinami **šaldymo agentais.** Kompresorius (*1*) varo freoną uždaru kontūru, sudarydamas kondensatoriaus gyvatuke (*2*) spaudimą, o šaldymo kameros garintuvo vamzdyne (*3*) — vakuumą. Sumažėjus garintuvo vamzdyne slėgiui, šaldymo agentas užverda ir aktyviai garuoja, imdamas šilumą



10.3 pav.



10.4 pav.

iš vamzdyno sienelių ir visos šaldymo kameros. Kartu kompresorius siurbia iš garintuvo freono garus, slegia juos ir varo į kondensatorių (*2*). Čia garai kondensuojasi. Kondensacijos šiluma, kaip nereikalinga, išsisklaido į aplinką, o skystas freonas per ventilį (*4*) grąžinamas į garintuvą.

Kompresoriaus variklį automatiškai įjungia ir išjungia termoreguliatorius, palaikantis šaldytuve nustatytą temperatūrą.

Šaldytuvas vietoje krosnies

Šaldymo mašiną galima panaudoti ir atvirkščiai — ne šaldymui, o šildymui. Tuo tikslu šaldymo kamerą reikia iškelti į lauką arba įleisti į ežero vandenį, o gyvatuką, kuriame išsiskiria agento kondensacijos šiluma, panaudoti patalpai apšildyti. Toks įrenginys vadinamas **šilumos siurbliu.** Tačiau šilumos siurbliu negalima gauti aukštos temperatūros. Pagalvokite, kodėl.

Naujausiame šaldytuvo „Snaigė“ modelyje jau yra darbo režimo perjungiklis — pasukus rankenėlę, šaldytuvas tampa šilumos siurbliu ir šaldymo kamera greitai atšyla.

§ 10.5. Šiluminių variklių energijos balanso uždavinių sprendimas

Daugelyje uždavinių aprašomos situacijos, kuriose kuro degimo energija (Q_k) virsta mechaniniu darbu (A) ir šilumos nuostoliais.

Visų šio tipo uždavinių sprendimas prasideda tokios pat fizikinės prasmės atskleidimu: dalis šilumos kiekio, išsiskyrusio degant kurui, virsta variklio (motociklo, traktoriaus, lėktuvo ar kt.) mechaniniu darbu, todėl energijos balanso lygtis visais šiais atvejais yra

$$\eta Q_k = A. \qquad (10.5)$$

Kurui degant išsiskirianti šiluma apskaičiuojama pagal (10.1) formulę, o mechaninis darbas — pagal (9.7), (9.8) arba vieną iš šių formulių:

$$A = Fs, \qquad (10.6)$$

$$A = Fvt, \qquad (10.7)$$

$$A = Nt, \qquad (10.8)$$

$$A = N\frac{s}{v}. \qquad (10.9)$$

Tolesnė sprendimo tvarka — kaip ir kitų, anksčiau spręstų (§ 9.5) uždavinių, susijusių su energijos balansu.

Pavyzdys. Kokiu vidutiniu greičiu važiuoja sunkvežimis, kurio variklis vysto 76,5 kW galią ir suvartoja 64 l benzino 120 km kelio? Variklio n. k. lygus 32%.

S p r e n d i m a s. 1. Šiuo atveju dalis sudeginto benzino energijos virto sunkvežimio variklio mechaniniu darbu:

$$\eta Q_k = A. \qquad (1)$$

2. Šilumos kiekis, kuris išsiskyrė degant benzinui, $Q_k = m_k q$. Sunkvežimio atliktas mechaninis darbas $A = N\frac{s}{v}$.

3. Pastarąsias išraiškas įrašome į balanso lygtį (1)

$$\eta m_k q = N\frac{s}{v}.$$

4. Išreiškiame ieškomąjį dydį:

$$v = \frac{Ns}{\eta m_k q}.$$

5. Randame sąlygoje ir lentelėse reikiamus duomenis:

$N = 76{,}5\ \text{kW} = 76{,}5 \cdot 10^3\ \text{W}$,

$s = 120\ \text{km} = 12 \cdot 10^4\ \text{m}$,

$\eta = 32\% = 0{,}32$,

$m_k = V_k \varrho = 62 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3 \cdot 7 \cdot 10^2\ \text{kg/m}^3 = 43{,}4\ \text{kg}$,

$q = 4{,}6 \cdot 10^7\ \text{J/kg}$. (III lent.)

6. Įrašome duomenis į ieškomojo dydžio išraišką ir apskaičiuojame:

$$v = \frac{76{,}5 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 10^4}{0{,}32 \cdot 43{,}4 \cdot 4{,}6 \cdot 10^7}\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 14{,}4\ \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Ats. $v = 14{,}4\ \text{m/s} = \dfrac{14{,}4 \cdot 3600}{100} = 51{,}8\ \text{km/h}$.

? *1. Koks būtų didžiausias šiluminio variklio naudingumo koeficientas, jeigu aušintuvo temperatūra būtų 0 K?*

2. Šildo ar šaldo kambarį šaldytuvas?

10.1. Motociklui važiuojant 54 km/h greičiu, variklis vysto 8,5 kW galią, o jo n. k. lygus 21%. Kokį kelią galima šitaip nuvažiuoti su 10 l benzino?

10.2. Gręžiant metalą rankiniu grąžtuvu, per 3 min nepertraukiamo darbo 50 g masės plieninis grąžtas įšilo 70,5 K. Kokia galia buvo vystoma gręžiant, jeigu grąžto įšilimui teko 15% visos suvartotos energijos?

1.4 skyrius
GARŲ SAVYBĖS

11 paskaita

Atmosferos ir hidrosferos sąveika

„Mus apsemiantis oras visados turi kurią dalį vandens garo; tie garai nėra matomi, jie ore yra pasileidę maždaug kaip druska arba cukrus vandenyj.“

Iš pirmojo lietuviško fizikos vadovėlio

§ 11.1. Sotieji garai ir jų savybės

Prisiminkime

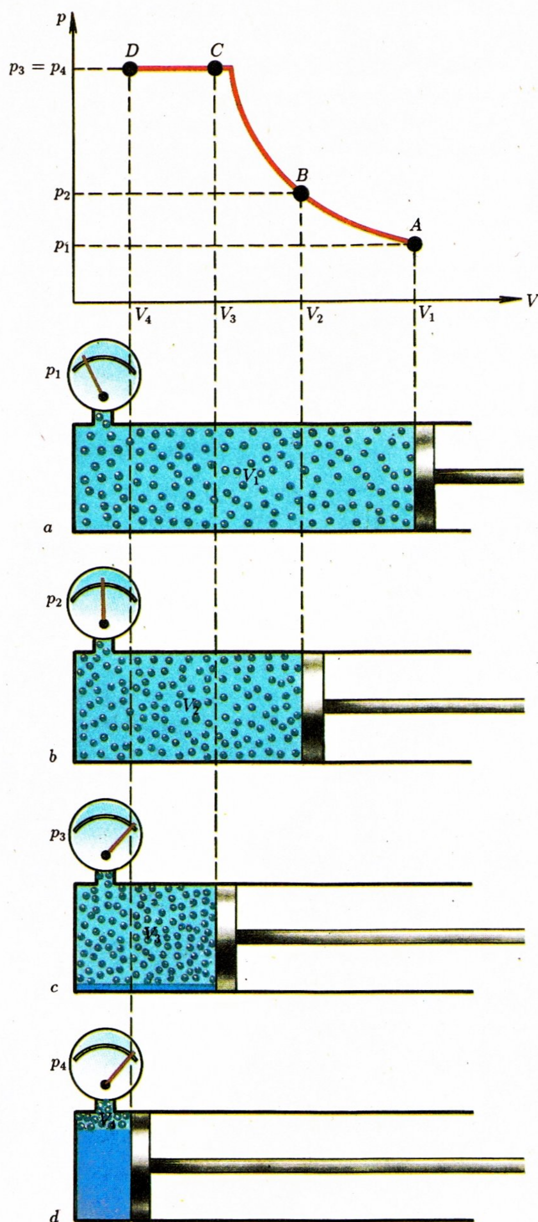
Su garavimo ir kondensacijos reiškiniais jau esame susipažinę pirmajame fizikos kurse. Žinome, kad *skysčio virsmas dujomis vadinamas* **garavimu,** o garavimo sparta priklauso nuo skysčio rūšies, nuo temperatūros ir skysčio paviršiaus ploto. Vėjyje skysčiai garuoja greičiau. Svarbu prisiminti, kad iš garuojančio skysčio išlekia pačios greičiausios, t. y. didžiausią energiją turinčios molekulės, todėl *skystis garuodamas aušta.*

Atvirkščias reiškinys, t. y. *garų virtimas skysčiu vadinamas* **kondensacija.** Kondensuodamiesi garai išskiria energiją. Prie skysčio paviršiaus vyksta vienu metu ir garavimas, ir kondensacija. Temperatūrai kylant intensyvėja garavimas, krintant — sparčiau vyksta kondensacija. Gali susidaryti tokios sąlygos, kai garavimas ir kondensacija susikompensuoja, t. y. kiek molekulių išlekia iš skysčio, tiek pat per tą patį laiką į jį sugrįžta. Tokia judri pusiausvyra tarp skysčio ir jo garų vadinama **dinamine pusiausvyra.** Dinaminė pusiausvyra greitai nusistovi uždarame inde. Tada skysčio kiekis inde nebesikeičia.

Kodėl netinka Boilio ir Marioto dėsnis?

Garai, esantys dinaminėje pusiausvyroje su savo skysčiu, vadinami **sočiaisiais garais.** Šis pavadinimas pabrėžia, kad sočiųjų garų koncentracija yra tomis sąlygomis maksimali. Štai tokių garų savybės mums dar nežinomos, o susiduriame su jais nuolatos. Pavyzdžiui, šiuolaikinėje energetikoje, verčiant šiluminę energiją elektros energija, būtinai „tarpininkauja“ sotieji garai. Taigi labai svarbu žinoti jų savybes, mokėti matuoti ir valdyti jų parametrus.

Įsivaizduokime, kad 11.1 paveiksle parodytu prietaisu izotermiškai slegiame van-



11.1 pav.

dens garus. Lėtai stumdami stūmoklį, mažinkime jų tūrį nuo V_1 iki V_3, kol ant vidinių cilindro sienelių pasirodys pirmieji skysčio lašai — garai taps sočiaisiais (11.1 pav., *a—c*). Slėgis tuo metu didės nuo p_1 iki p_3. Grafiškai šį procesą iliustruoja izotermė *ABC*. Ji beveik tokia, kaip ir idealiųjų dujų. Taigi *nesotiesiems garams tinka Boilio ir Marioto dėsnis,* ir tuo tiksliau, kuo garai tolimesni nuo sočiųjų.

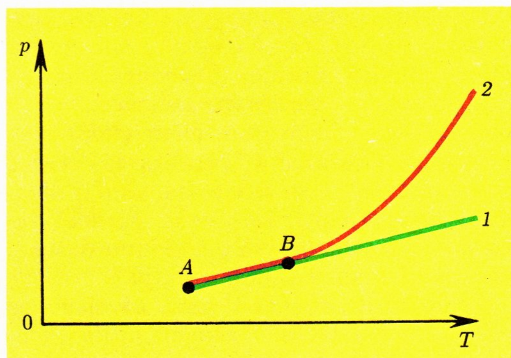
Nuo tūrio V_3 (11.1 pav., *c*) slegiame jau sočiuosius garus. Mažinant jų tūrį, manometro rodomas slėgis nesikeičia (11.1 pav. $p_4 = p_3$, grafiko dalis *CD*). Taigi, *nekintant temperatūrai, sočiųjų garų slėgis nepriklauso nuo tūrio.* Taip yra todėl, kad, sumažėjus sočiųjų garų tūriui, sutrinka dinaminė pusiausvyra — kondensacija pasidaro intensyvesnė už garavimą ir skysčio daugėja (11.1 pav., *d*), o garų tankis ir slėgis nekinta.

Jeigu pakartotume bandymą su spirito, eterio, angliarūgštės garais, tai įsitikintume, kad *kiekvieno skysčio sočiųjų garų slėgis yra skirtingas.*

Kodėl netinka Šarlio dėsnis?

Sočiųjų garų slėgis priklauso nuo temperatūros. Tuo galime įsitikinti 11.1 paveiksle parodytą prietaisą papildę termometru, šildytuvu ir nejudamai įtvirtinę stūmoklį. Gausime tą patį prietaisą, kuriuo tyrėme izochorinį procesą dujose (6.1 pav.).

Šildydami cilindrą matysime, kad garų slėgis didėja, o skysčio kiekis mažėja. Bandymo rezultatai rodo, kad sočiųjų garų slėgis nėra proporcingas temperatūrai — jis didėja sparčiau (11.2 pav., kreivė *2*), negu turėtų didėti pagal Šarlio dėsnį (11.2 pav., kreivė *1*). Taip yra todėl, kad sočiųjų garų slėgis didėja ne vien dėl molekulių greičio didėjimo kylant temperatūrai, bet ir dėl molekulių koncentracijos didėjimo garuojant skysčiui (kaip prisimename, $p = n_0kT$).



11.2 pav.

Taigi esminis skirtumas tarp idealiųjų dujų ir sočiųjų garų yra tai, kad *sočiųjų garų izoprocesuose kinta ne vien termodinaminiai parametrai, bet ir masė.* Sotieji garai turi molekulių rezervą — skystį.

§ 11.2. Oro drėgmė

Drėgmės reikšmė

Žemė — vienintelė Saulės sistemos planeta, turinti skysto vandens. Žemės vandenys, ledynai ir ore esančių garų sluoksnis sudaro vadinamąją hidrosferą. Jeigu hidrosferos vanduo vienodai pasiskirstytų planetos paviršiuje, tai visą Žemę apsemtų 2 km storio sluoksniu. Hidrosfera — milžiniškas natūralus akumuliatorius, kuris vasarą kaupia saulės spindulių energiją ir palaipsniui ją grąžina žiemą. Nors jūros ir vandenynai užima 71% mūsų planetos paviršiaus ir nuolatos garuoja, atmosferoje tėra apie 1% vandens garų ir tik palyginti retais atvejais jie būna sotieji. Vandens garai atmosferoje daro lemiamą įtaką klimatui ir gyvajam pasauliui. Nuo jų kiekio ore didžia dalimi priklauso temperatūros svyravimai, krituliai, žemės derlingumas, gyvūnijos gausumas ir žmogaus sveikata.

Ne vien augalus ir gyvūnus, bet ir pramonės gaminius ar maisto produktus palankiai veikia tam tikro drėgnumo oras. Labai svarbu mokėti palaikyti reikiamą drėgmę saugant knygas, paveikslus, audinius, maisto produktus ir kt.

Oro drėgmę apibūdinančios sąvokos

Ore esančių vandens garų masės ir tūrio santykis vadinamas **absoliutine drėgme:**

$$\varrho_a = \frac{m}{V}. \qquad (11.1)$$

Kitaip tariant, absoliutinė drėgmė ϱ_a — tai ore esančių garų tankis; jo vienetas $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Meteorologijoje absoliutinė drėgmė gali būti apibūdinama ne garų tankiu, o jų slėgiu p_a, nes jis yra proporcingas garų tankiui.

Tačiau absoliutinė drėgmė nerodo, ar ore esantys garai yra artimi sotiesiems, ar ne. O tai svarbu, nes lemia garavimo ir kondensacijos spartą. Todėl įvedama **santykinės drėgmės** sąvoka. *Santykine oro drėgme vadinamas absoliutinės drėgmės ir sočiųjų garų tankio santykis.* Santykinė drėgmė išreiškiama procentais:

$$B = \frac{\varrho_a}{\varrho_s} \cdot 100\%. \qquad (11.2)$$

Be to, ją galima apskaičiuoti ir kaip atitinkamų garų slėgių santykį.

Palankiausia žmogaus sveikatai santykinė drėgmė yra 40—60%. Sočiųjų vandens garų tankis ir slėgis įvairiose temperatūrose nurodytas IV lentelėje.

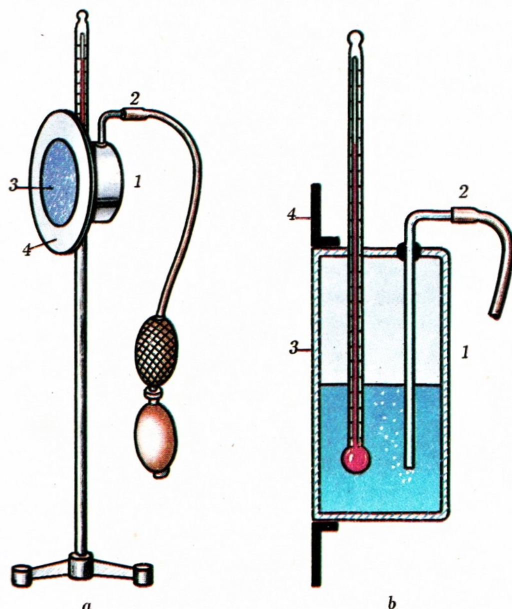
§ 11.3. Prietaisai oro drėgmei matuoti

Kada iškris rasa?

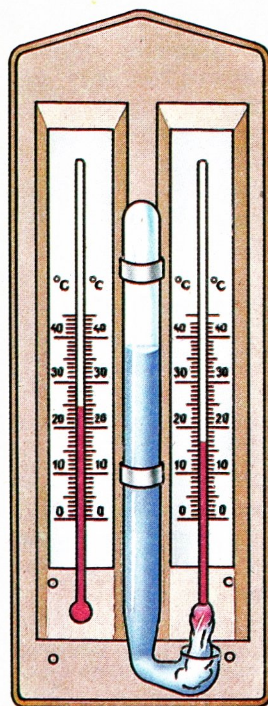
Absoliutinę drėgmę galima nustatyti aušinant orą ir jame esančius garus iki pasirodys ra-

sa. *Temperatūra, kurioje ore esantys vandens garai tampa sočiaisiais, vadinama* **rasos tašku.** Rasos tašką, esant įvairiam garų tankiui, taip pat rasime IV lentelėje; ir atvirkščiai: žinodami rasos tašką, iš šios lentelės sužinosime tos temperatūros sočiųjų garų tankį — absoliutinę drėgmę.

Prietaisas rasos taškui nustatyti vadinamas **higrometru** (11.3 pav.). Jis sudarytas iš metalinės kameros *1*, į kurią įstatytas termometras. Per termometro angą į kamerą įpilama eterio ir vamzdeliu *2* per jį gumine kriauše pučiamas oras. Sparčiai garuodamas eteris aušta, ir priekinė blizganti nikeliuota kameros sienelė *3* aprasoja, pasidaro matinė. Kad būtų lengviau pastebėti rasos pasirodymo momentą, priekinę sienelę juosia izoliuotas nuo kameros nikeliuotas žiedas *4*, kuris nerasoja, lieka blizgantis. Rasos pasirodymo momentu fiksuojama temperatūra — rasos taškas — ir IV lentelėje randama absoliutinė drėgmė.



11.3 pav.



11.4 pav.

Žinant absoliutinę drėgmę ϱ_a ir oro temperatūrą, galima rasos taškų lentelėje rasti sočiųjų garų tankį (arba slėgį) ϱ_s ir apskaičiuoti santykinę oro drėgmę. Pavyzdžiui, jeigu rasos taškas yra 11 °C, o oro temperatūra 18 °C, tai santykinė drėgmė

$$B = \frac{1{,}00 \cdot 10^{-2}}{1{,}54 \cdot 10^{-2}} \cdot 100\,\% = 65\,\%.$$

Drėgmę matuoja... termometrai

Yra prietaisų santykinei drėgmei nustatyti be skaičiavimų. Toks yra **psichrometras** (11.4 pav.). Psichrometrą sudaro du vienodi termometrai ir indas su vandeniu. Vieno termometro rezervuaras apvyniotas plona drobele, kurios galas įmerktas į vandenį.

Kitas termometras yra sausas — rodo oro temperatūrą. Šlapiasis termometras rodo žemesnę temperatūrą, nes nuo drobelės garuoja vanduo ir jį aušina. Kuo sausesnis oras, tuo spartesnis garavimas ir tuo daugiau skiriasi sausojo ir šlapiojo termometrų rodoma temperatūra. Pagal sausojo termometro rodomą temperatūrą ir abiejų rodomų temperatūrų skirtumą specialioje psichrometrinėje lentelėje (V lentelė) randama santykinė oro drėgmė.

Oro drėgmei matuoti naudojami ir tobulesni sudėtingesnės konstrukcijos elektriniai bei elektroniniai prietaisai. Santykinę drėgmę juose tiesiog rodo rodyklė arba skaitmeninis tablo.

Prietaisai, brėžiantys drėgmės kitimo kreivę, vadinami **higrografais.** Kreivė (higrograma) užrašoma popieriaus juostoje, uždėtoje ant būgno, kurį suka laikrodinis mechanizmas.

11.1. Nustatykite, kokią oro drėgmę rodo 11.4 paveiksle nupieštas psichrometras.

11.2. Oro temperatūra patalpoje 25 °C, santykinė drėgmė 70%. Kiek vandens išsiskirs iš kiekvieno kubinio metro oro temperatūrai nukritus iki 16 °C.

?

1. Pasakykite ir paaiškinkite, nuo ko priklauso skysčio garavimo greitis.
2. Kokius garus atitinka 11.2 paveiksle kreivės 2 dalis AB? Ką galite pasakyti apie jų savybes?
3. Kodėl 11.2 paveiksle 1 ir 2 grafikai prasideda taške A, o ne taške 0?
4. Dviem atvejais abu psichometro termometrai rodo vienodą temperatūrą. Kada?
5. Kodėl apledėja vidinė langų stiklo pusė, o ne išorinė?
6. Kodėl, norėdami greičiau ataušinti sriubą, pučiame?

11.3. Oro temperatūra 20 °C, rasos taškas 12 °C. Kokia absoliutinė ir santykinė oro drėgmė?

11.4. Temperatūrai nukritus nuo 27 iki 10 °C, iš kiekvieno kubinio metro oro išsiskyrė 8 g vandens. Kokia buvo santykinė oro drėgmė 27 °C temperatūroje?

Tema referatui: „Vandens apytaka gamtoje".

---

12 paskaita

GARAI ŽMOGAUS TARNYBOJE

„Kas puode nesilaiko?"

Lietuviška mįslė

§ 12.1. Virimas

Prisiminkime

Pirmajame fizikos kurse buvo aiškinta, kad vandeniui kaistant jame atsiranda burbuliukų — tai išsiskiria vandenyje ištirpęs oras. Tam tikroje temperatūroje kylantys iš vandens burbuliukai labai padidėja, iškyla į paviršių ir sproginėja, juose buvę garai išeina į atmosferą — vanduo verda. Verdančio skysčio temperatūra nesikeičia. Kiekvienas skystis verda jam būdingoje temperatūroje, kuri vadinama **virimo temperatūra.** *Energijos kiekis, reikalingas 1 kg skysčio paversti garais virimo temperatūroje, vadinamas specifine garavimo šiluma.* Ji žymima raide L ir matuojama J/kg. Šilumos kiekis, reikalingas m kg skysčio išgarinti,

$$Q = Lm. \tag{12.1}$$

Įvairių skysčių virimo temperatūros (esant normaliajam slėgiui) ir specifinės garavimo šilumos nurodytos VI lentelėje. Kondensuodamiesi garai atiduoda tiek pat energijos, kiek buvo išeikvota jiems sudaryti.

Ar verda šaltas vanduo?

Dabar galime sukonkretinti virimo sąlygą: *skystis užverda tada, kai jo sočiųjų garų slėgis burbuliukuose tampa lygus išoriniam slėgiui.* Nustebote, kad nieko nepasakyta apie virimui būtiną temperatūrą? Jos nurodyti ir neįmanoma, nes kuo didesnis išorinis slėgis, tuo aukštesnė virimo temperatūra. Pavyzdžiui, hermetiškai uždarytame

greitviryje puode susidaro $2 \cdot 10^5$ Pa (2 at) slėgis ir vanduo užverda tik 120 °C temperatūroje. Elektrėnų VRE garo katiluose palaikomas 15 MPa (150 at) slėgis, todėl virimo temperatūra siekia 330 °C. Ir atvirkščiai: slėgiui mažėjant virimo temperatūra krinta. Galima užvirinti kolboje ir kambario temperatūros vandenį, išsiurbiant iš kolbos orą.

Čiurlionio viršukalnėje (Pamyro kalnuose) 5794 m aukštyje, kur oras maždaug perpus praretėjęs, vanduo užverda nepasiekęs 80 °C temperatūros. Štai kodėl Mėnulyje nėra ir negali būti vandens: nesant atmosferos slėgio, jis užvirtų ir išgaruotų.

Simas Klaidelė pasiūlė „vakuuminio greitvirio puodo" projektą: siurbiant orą iš hermetiškai uždaryto puodo, sumažėja slėgis ir vanduo greitai užverda (12.1 pav.).
Kodėl projektas buvo atmestas, nežiūrint milžiniškos kuro ekonomijos?

„Duokim garo" uždaviniams!

Sudarydami šilumos balansą uždaviniams apie garavimą ir kondensaciją, vadovausimės § 8.4 nurodymais. Reikia itin atidžiai išsiaiškinti balansą sudarančius šilumos kiekius.

Pavyzdys. 0,70 kg masės variniame kalorimetre yra 0,80 l vandens, kurio temperatūra 285 K. Kokia nusistovės temperatūra, įleidus į tą kalorimetrą 0,050 kg 373 K temperatūros garų?

Vario specifinė šiluma $c_v = 380 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ (II lent.). Vandens specifinė garavimo šiluma $r =$

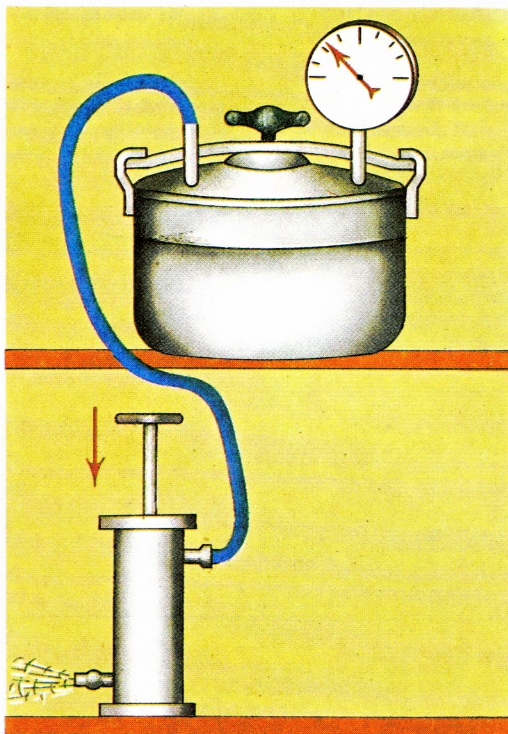
$= 2{,}26 \cdot 10 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ (IV lent.).

Atvaizduojame aprašytąjį procesą (12.2 pav.).

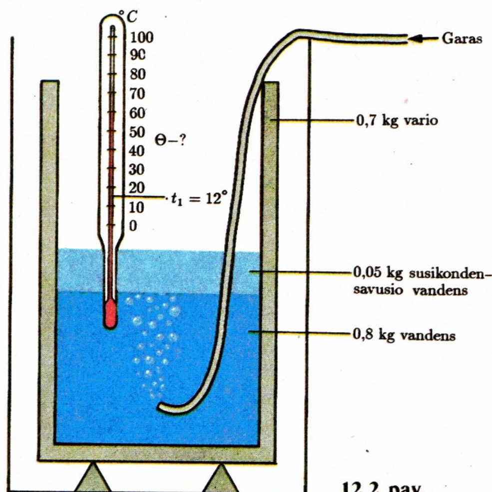
S p r e n d i m a s. 1. Balansą sudaro keturi šilumos kiekiai:

1) šilumos kiekis, kurį *atidavė* besikondensuodami garai, $Q_1 = m_1 L;$

2) šilumos kiekis, kurį *atidavė* kondensatas,



12.1 pav.

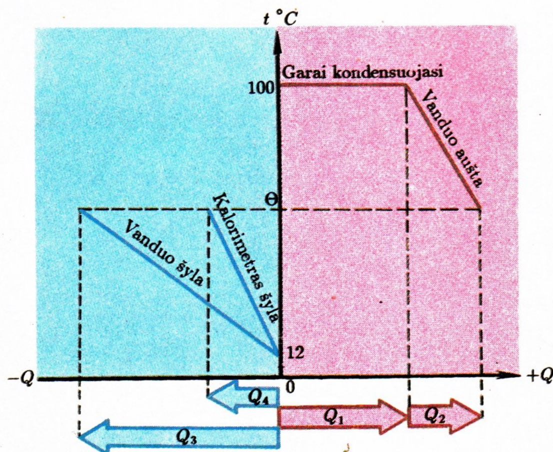


12.2 pav.

ataūšdamas nuo 100 °C (373 K) iki nusistovėjusios temperatūros Θ, $Q_2 = m_2 c_2 \Delta t_2 = m_2 c_2 (t_2 - \Theta)$;

3) šilumos kiekis, kurį *gavo* vanduo, sušildamas nuo 12 °C (285 K) iki nusistovėjusios temperatūros Θ, $Q_3 = m_3 c_3 \Delta t_3 = m_3 c_3 (\Theta - t_3)$;

4) šilumos kiekis, kurį *gavo* kalorimetras, sušildamas nuo 12 °C (285 K) iki nusistovėjusios temperatūros Θ, $Q_4 = m_4 c_4 \Delta t_4 = m_4 c_4 (\Theta - t_4)$.



12.3 pav.

2. Sudarome šilumos balanso lygtį:

$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$.

Šio uždavinio šiluminio balanso sudarymas grafiškai iliustruojamas 12.3 paveiksle.

3. Įrašome šilumos kiekių išraiškas:

$$m_1 L + m_2 c_2 (t_2 - \Theta) = m_3 c_3 (\Theta - t_3) + m_4 c_4 (\Theta - t_4).$$

4. Išreiškiame ieškomąjį dydį Θ:

$$m_1 L + m_2 c_2 t_2 - m_2 c_2 \Theta = m_3 c_3 \Theta - m_3 c_3 t_3 + m_4 c_4 \Theta - m_4 c_4 t_4;$$

$$m_2 c_2 \Theta + m_3 c_3 \Theta + m_4 c_4 \Theta = m_1 L + m_2 c_2 t_2 + m_3 c_3 t_3 + m_4 c_4 t_4;$$

$$\Theta = \frac{m_1 L + m_2 c_2 t_2 + m_3 c_3 t_3 + m_4 c_4 t_4}{m_2 c_2 + m_3 c_3 + m_4 c_4}.$$

5. Sąlygoje ir lentelėse suieškome reikiamus duomenis. Kad aritmetinius veiksmus galėtume atlikti su mažesniais skaičiais, temperatūras išreiškiame °C; jais gausime ir apskaičiuotąją temperatūrą.

$m_1 = 0{,}05$ kg,
$L = 2{,}26 \cdot 10^6$ J/kg,
$m_2 = m_1 = 0{,}05$ kg,
$c_2 = 4{,}2 \cdot 10^3$ J/(kg · K),
$t_2 = 373$ K $= 100$ °C,
$m_3 = 0{,}8$ kg,
$c_3 = c_2 = 4{,}2 \cdot 10^3$ J/(kg · K),
$t_3 = 285$ K $= 12$ °C,
$m_4 = 0{,}7$ kg,
$c_4 = 3{,}8 \cdot 10^2$ J/(kg · K),
$t_4 = t_3 = 285$ K $= 12$ °C.

6. Įrašome duomenis ir apskaičiuojame:

$$\Theta = \frac{0{,}05 \cdot 2{,}26 \cdot 10^6 + 0{,}05 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 100 + 0{,}8 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 12 + 0{,}7 \cdot 3{,}8 \cdot 10^2 \cdot 12\ °C}{0{,}05 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 + 0{,}8 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 + 0{,}7 \cdot 3{,}8 \cdot 10^2} = 46{,}3\ °C.$$

Ats. $\Theta = 46{,}3$ °C.

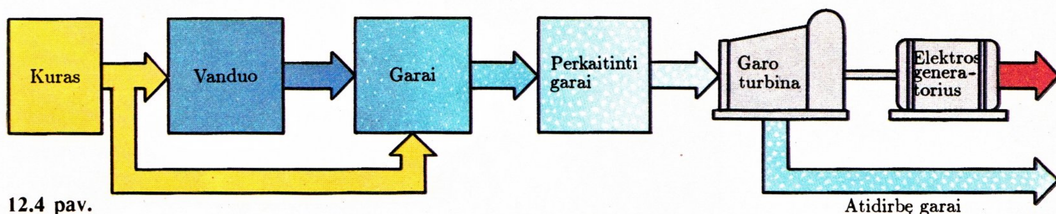
§ 12.2. Garų naudojimas buityje ir technikoje

Visose šiluminėse, taip pat ir atominėse elektrinėse energijos virsmų grandinėje dalyvauja garai. Kurui degant išsiskirianti šiluma vartojama vandeniui garinti, o garų srautas, sukdamas turbiną, jau verčia savo energiją turbinos mechanine energija, o pastaroji toliau verčiama elektros energija (12.4 pav.).

Tokios sistemos naudingumo koeficientas daugiausia priklauso nuo garų temperatūros, todėl išėję iš katilo garai, prieš nukreipiant juos į turbinas, dar įkaitinami iki 500 °C ir aukštesnės temperatūros. Tokie garai tampa sausi ir skaidrūs; jie vadinami **perkaitintaisiais.**

Vertingos „atliekos“

Išėję iš turbinos atidirbę garai dar yra aukštos temperatūros — turi daug energijos, todėl



12.4 pav.

gali būti tiekiami į miestų apšildymo sistemas arba naudojami gamyklose technologiniams procesams.

Termofikacinės elektrinės (TE) centralizuotai tiekia vamzdynais gyvenvietėms ir įmonėms garą arba karštą vandenį. Gaminant kartu elektros ir šiluminę energiją, suvartojama mažiau kuro negu gaminant atskirai elektros energiją elektrinėse ir šiluminę energiją katilinėse.

Didžiausios TE Lietuvoje yra Vilniaus (360 MW), Mažeikių (250 MW) ir Kauno (212 MW).

? *1. Kaip žemo slėgio sąlygomis — aukštai kalnuose — išvirti mėsą?*
2. Kaip garai gali būti panaudoti technologiniams procesams gamyklose?

12.1. 50 g masės aliumininiame kalorimetre yra 250 g vandens. Kiek 373 K temperatūros garų reikia įleisti į kalorimetrą, kad vandens temperatūra pakiltų nuo 289 iki 363 K?

12.2. Šildytuvo gyvatuku leidžiami 100 °C temperatūros garai, o iš jo išteka 90 °C temperatūros kondensatas. Per valandą pro šildytuvą buvo praleista 2,0 m^3 vandens, kurio pradinė temperatūra 8 °C, o iš gyvatuko ištekėjo 360 l kondensato. Iki kokios temperatūros įšilo vanduo, jeigu šildytuvo n. k. 80%?

---

13 paskaita

KRIZĖS, KURIAS TIRIA FIZIKA

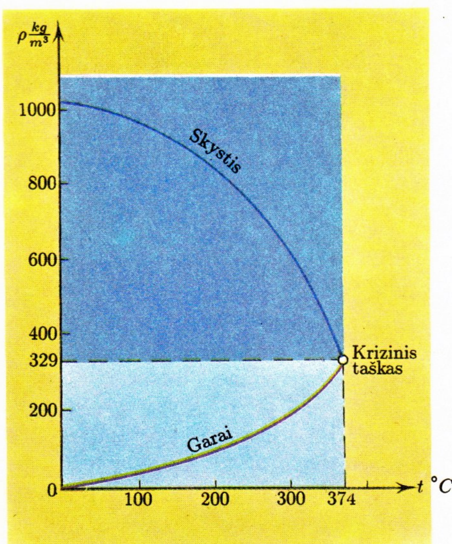
§ 13.1. Krizinė medžiagos būsena

Perkaitinti iki tam tikros temperatūros garai įgyja dar vieną svarbią savybę: jų neįmanoma paversti skysčiu. Galima tokius garus slėgti kiek norima — skysčio neatsiras. Pavyzdžiui, vandens garus galima slegiant paversti skysčiu tik žemesnėje kaip 374 °C temperatūroje. Aukščiau šios temperatūros vanduo neegzistuoja. Kodėl?

Įsivaizduokime, kad kaitiname uždarą indą su skysčiu. Temperatūrai kylant skystis plečiasi, jo tankis mažėja, o sočiųjų garų tankis ir slėgis didėja, kol tam tikroje temperatūroje uždaroje ertmėje garų ir skysčio tankis susilygina — išnyksta skirtumas tarp skysčio ir jo sočiųjų garų (13.1 pav.), išnyksta jų riba. Tokia medžiagos būsena vadinama **krizine,** o tos būsenos parametrai — temperatūra, tankis ir slėgis — vadinami **kriziniais parametrais.** Pavyzdžiui, vandens kriziniai parametrai yra: $t_{kr} = 374$ °C, $p_{kr} = 22{,}1$ MPa (225,6 at), $\varrho_{kr} = 329$ kg/m^3. Kai kurių medžiagų kriziniai parametrai surašyti VII lentelėje.

Kuo skiriasi garai nuo dujų?

Dabar galima paaiškinti, kodėl vienas medžiagas vadiname dujomis, kitas — garais: *garai — tai dujinės medžiagos, kurių temperatūra žemesnė už krizinę.* Juos visuomet galima suskystinti slegiant. *Dujos —*



13.1 pav.

dujinės medžiagos, kurių temperatūra įprastinėmis sąlygomis aukštesnė už krizinę. Norint dujas suskystinti, būtinai reikia pirmiau jas atšaldyti žemiau krizinės temperatūros, tada slėgti.

Ar lyja lietus Veneroje?

Kosminių stočių „Venera-3“ ir „Venera-10“ prietaisai nustatė, kad Veneros paviršiaus temperatūra yra 477 °C, taigi žymiai aukštesnė negu vandens krizinė, todėl šioje planetoje negali būti vandens.

§ 13.2. Dujų skystinimas ir skystų dujų vartojimas

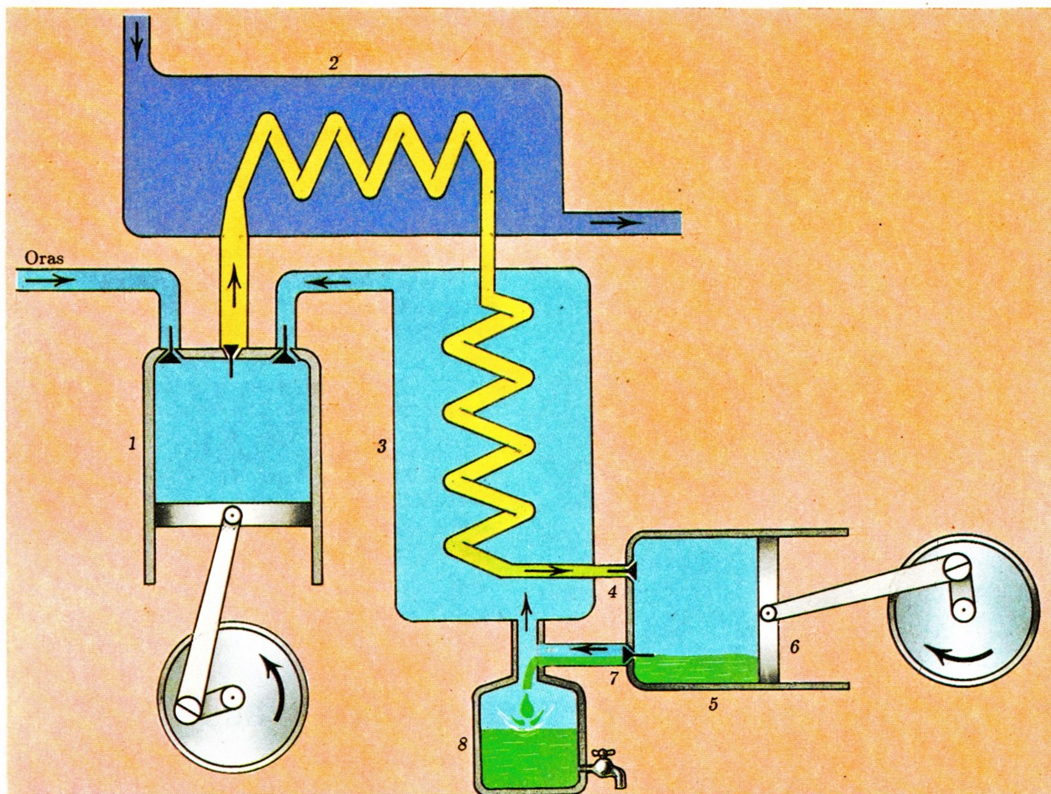
Kol nebuvo žinoma apie krizines temperatūras, įvairias dujas buvo bandoma suskystinti vien slegiant. Taip pasisekė suskystinti anglies dioksidą ($t_{kr} = 31{,}1$ °C), amoniaką ($t_{kr} = 132$ °C), chlorą ($t_{kr} = 144$ °C) ir daugelį kitų dujų. Tačiau lengvesnės dujos — azotas, vandenilis, deguonis, helis ir kt.— nesidavė suskystinamos, nors buvo sudaromi milžiniški, iki 3000 at, slėgiai. Jas imta laikyti nesuskystinamomis dujomis.

Tik po to, kai paaiškėjo, kad dujoms suskystinti būtina žemesnė už krizinę temperatūra, prasidėjo dujų skystinimo era. 1877 m. buvo suskystintas oras, taigi deguonis ($t_{kr} = -119$ °C) ir azotas ($t_{kr} = -147$ °C), 1895 m.— vandenilis ($t_{kr} = -240$ °C), o 1908 m. paskutinės dujos — helis ($t_{kr} = -268$ °C). Tam prireikė pasiekti vos 5 K aukštesnę už absoliutinį nulį temperatūrą.

Žingsniai į šalčio karaliją

Pramoninį būdą dujoms skystinti išrado vokiečių fizikas Karlas L i n d ė (1842—1934). Lindės mašinoje (13.2 pav.) kompresoriumi (*1*) dujos suslegiamos iki 200 at ir rezervuare (*2*) ataušinamos pratekančiu šaltu vandeniu. Kameroje (*3*) dujos dar kartą ataušinamos jau atšaldytomis dujomis ir pro vožtuvą (*4*) patenka į *stūmoklinį detanderį* (*5*), kuriame staigiai plečiasi, be to, stumia stūmoklį (*6*) ir dėl to dar labiau atšąla. Iš detanderio pro vožtuvą (*7*) dujos patenka į aušintuvo kamerą (*3*), kur, tekėdamos priešinga kryptimi, šaldo sekančią dujų porciją ir vėlei grįžta į kompresorių (*1*). Taip procesas kartojasi, kol dujos ataušta žemiau krizinės temperatūros, pradeda kondensuotis ir skystis teka į indą (*8*). Per vieną ciklą dujos ataušta 10—12 °C, todėl toks šaldymo metodas vadinamas **laiptiniu.**

1938 m. rusų fizikas Piotras K a p i c a sukūrė labai našią šaldymo mašiną su **turbininiu detanderiu** (13.3 pav.). Skystinamos dujos detanderyje nukreipiamos į nedidelės turbinos mentes, ją sukdamos praranda vidinę energiją ir kondensuojasi. Vietoje laiptinio proceso stūmokliniame detanderyje čia vyksta nenu-



13.2 pav.

trūkstamas šaldymo procesas. Turbininiu detanderiu suskystinama 5 t oro per valandą.

Už atradimus žemų temperatūrų fizikoje P. Kapica 1978 m. apdovanotas Nobelio premija.

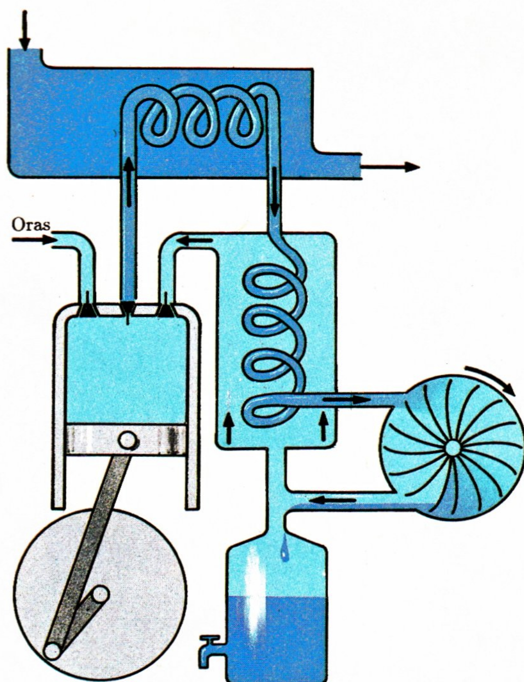
Dujų plėtimasis detanderiuose naudojamas elektros generatoriams, kompresoriams, siurbliams sukti. Jei detanderis nesuka mašinų, jis stabdomas hidrauliniais stabdžiais.

Skystos dujos laikomos specialiuose atviruose termosuose — **Diuaro induose** (13.4 pav.).

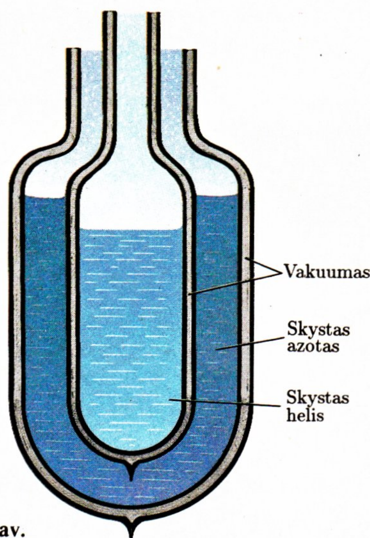
Trąšos iš oro

Iš skysto oro nesunku išskirti frakciniu garinimu jį sudarančias dujas. Taip gaunamas skystas azotas ir deguonis. Iš azoto gaminamas amoniakas, azotinės trąšos. Deguonis vartojamas metalų suvirinimo ir pjovimo įtaisuose, aukštakrosnėse, medicinoje ir kt. Skystas deguonis yra raketų kuro sudėtinė dalis, todėl daug jo suvartojama kosminėje technikoje.

Skystos dujos vartojamos mokslinių tyrimų reikalams, dažniausiai labai žemoms temperatūroms gauti. Absoliučiam nuliui artimose temperatūrose vyksta visai nauji



13.3 pav.



13.4 pav.

reiškiniai, kuriuos tirdami mokslininkai giliau prasiskverbia į medžiagos sandaros paslaptis (§ 26.3).

13.1. Kokios agregatinės būsenos yra azotas, kai temperatūra 123 K ir slėgis $3{,}5 \cdot 10^6$ Pa; deguonis, kai temperatūra 153 K ir slėgis $4{,}8 \cdot 10^6$ Pa; eteris, kai temperatūra 463 K ir slėgis $4{,}0 \cdot 10^6$ Pa?

?

1. Kokią temperatūrą vadiname krizine?
2. Kodėl Diuaro indų su skystomis dujomis negalima sandariai užkimšti?

13.2. 20 °C temperatūros sotinantieji vandens garai buvo atskirti nuo skysčio ir įšildyti iki 30 °C, nekintant tūriui. Koks pasidarė jų slėgis? Kaip vadinami tokie garai?

13.3. Ar galima verdančiame, esant normaliam slėgiui, deguonyje (virimo taškas 90 K) atšaldyti iki krizinės temperatūros azotą, vandenilį, angliarūgštės dujas?

1.5 skyrius
SKYSČIŲ SAVYBĖS

14 paskaita
SKYSČIO PAVIRŠIAUS KEISTENYBĖS

§ 14.1. Medžiagos skystosios būsenos charakteristika

Dar kartą apie skysčių struktūrą

Pirmajame fizikos kurse buvo aiškinama, kad *skysčiai nekeičia tūrio, bet lengvai keičia formą.* Jie įgyja formą to indo, į kurį įpilami. Molekulės skystyje išsidėsčiusios taip glaudžiai, kad traukia viena kitą (prisiminkite 3.2 paveikslą). Tačiau ši trauka nepakankamai stipri, kad skystis išlaikytų savo formą. Dar šio šimtmečio pradžioje

manyta, kad skysčių molekulės, kaip ir dujų, juda chaotiškai, kad skysčiai skiriasi nuo dujų tik mažesniu atstumu tarp molekulių ir didesne tarpusavio traukos jėga. Tačiau nuodugniau ištyrus paaiškėjo, kad tam tikros tvarkos esama ir skysčio molekulių išsidėstyme — nedideliame tūryje jos sudaro kažką panašaus į kristalinę gardelę (14.1 pav., *a*), tik molekulės, užimančios gardelės mazgus, laikas nuo laiko (maždaug kas 10^{-11} s) peršoka iš vieno mazgo į kitą. Todėl sakoma, kad *skysčiai turi kristalinės sandaros pradą — juose yra tik artimoji molekulių išsidėstymo tvarka* (žr. 16.1 pav., *b*).

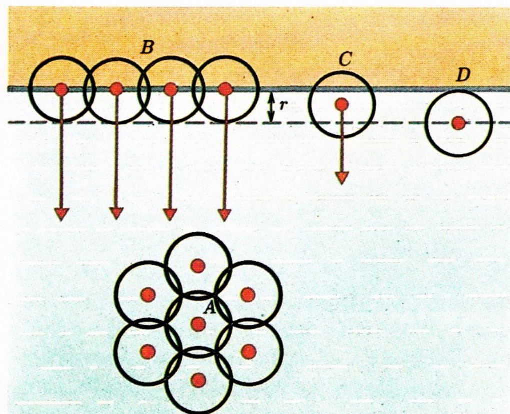
Kodėl „lašas po lašo — akmenį pratašo?"

Reikia patikslinti ir teiginį, kad skysčiai vien **takūs**, juose neveikia tamprumo jėgos. Tokia nuomonė susidarė todėl, kad paprastai skysčiai deformuojami lėtai ir takumas pasireiškia ryškiau negu tamprumas. Tačiau tamprumo jėgos lemia kitą skysčio savybę — klampumą (§ 15.3). Klampūs skysčiai pastebimai priešinasi formos keitimui. Todėl galime sakyti, kad skysčiai turi ir savybių, būdingų kietiesiems kūnams. Taigi skysčiai normaliomis sąlygomis turi ir dujų, ir kietojo kūno, ir savitų, tik jiems būdingų savybių. Jie yra tarpinė būsena tarp kietosios ir dujinės, tačiau pagal savo vidinę struktūrą artimesni kietiesiems kūnams negu dujiniams.

§ 14.2. Skysčio paviršiaus sluoksnis

Reiškiniai skysčio ir dujų sandūroje

Daugelis reiškinių rodo, kad skysčių paviršiuje tartum esama savotiškos nematomos plonos tamprios plėvelės. Atsargiai padėkime ant vandens metalinę adatėlę — ji neskęsta, laikosi paviršiuje; bet jeigu, adatėlę pakreipę, jos galą panardinsime, tai ji lyg pro pradurtą vandens paviršiuje skylutę nugrims. Į pakankamai tankų rėtį atsargiai pilamas vanduo neišbėga. Kai kurie vandeniniai vabalai lengvai bėgioja vandens paviršiumi. Taigi skysčio paviršiaus būsena yra kitokia, negu gilesnių sluoksnių.



14.1 pav.

Kodėl taip yra?

Išnagrinėkime jėgas, veikiančias molekulę skysčio viduje ir paviršiuje (14.1 pav.). Skysčio viduje esančią molekulę *A* aplinkinės molekulės, esančios jos veikimo sferoje, traukia į visas puses vienodai. Molekulė lieka pusiausvyroje ir gali judėti vienodai visomis kryptimis. Visai kitokioje padėtyje atsidūrusios molekulės *B*, esančios skysčio paviršiuje. Apatinėje jų molekulinio veikimo sferos dalyje yra skystis, viršutinėje — skysčio garai ir oras, kurių traukos galima nepaisyti. Taigi apatinių skysčio molekulių traukos jėgų nėra kam atsverti, ir jų atstojamoji traukia molekules *B* į skysčio vidų.

Panašioje padėtyje yra ir molekulė *C*, tik ją veikianti atstojamoji jėga yra mažesnė. Molekulė *D*, kaip ir *A*, jau yra pusiausvyroje. Taigi *visas skysčio paviršiaus molekules, esančias molekulinių jėgų siekio* ($r = 10^{-9}$ m) *storio sluoksnyje, veikia jėga, nukreipta į skysčio vidų.* Kaip bitės, purškiant spiečių vandeniu, spraudžiasi į

spiečiaus vidų, taip panašiai paviršiaus sluoksnio molekulės yra traukiamos į skysčio gilumą. Suprantama, jos vis dėlto lieka paviršiuje, nes viduje paprasčiausiai nėra tuščios vietos. Molekulinių jėgų veikiamas paviršiaus sluoksnis slegia skystį, sudaro **molekulinį slėgį.**

Fantastinis slėgis skysčių viduje

Molekulinis slėgis — tai paties skysčio molekulių sąveikos rezultatas, todėl jam negalioja Paskalio dėsnis. *Molekulinio slėgio jėga veikia tik skysčio molekules ir neveikia panardinto į skystį kūno.* Todėl molekulinio slėgio neįmanoma tiesiogiai išmatuoti prietaisais, jis apskaičiuojamas teoriškai. Molekulinis slėgis yra labai didelis: pavyzdžiui, vandenyje jis lygus $11 \cdot 10^8$ Pa (11 000 at). Štai kodėl skysčiai nekeičia savo tūrio slegiami,— jie jau yra suslėgti milžiniško savo paties paviršiaus molekulinio slėgio.

§ 14.3. Skysčio paviršiaus energija

Ir skysčiai turi savo formą

Skysčio paviršiaus molekules veikia jėga, traukianti į skysčio vidų, o judėti tos jėgos kryptimi jos negali. Tai reiškia, kad *kiekviena paviršiaus sluoksnio molekulė turi potencinės energijos,* panašiai kaip akmuo, laikomas pakeltas ir traukiamas Žemės. Visa skysčio paviršiaus energija yra tiesiog proporcinga jo plotui. Ji vadinama **paviršiaus energija.** Žinoma taisyklė, kad *sistema savaime pereina į tokią būseną, kurioje ji turi mažiausią potencinę energiją,* galioja ir skysčiams. Taigi *skysčio paviršius tik tada būna pastovioje pusiausvyroje, kai jo potencinė energija minimali.* Dėl šios priežasties skysčio paviršius visuomet stengiasi susitraukti taip, kad būtų mažiausio ploto.

Iš visokių to paties tūrio kūnų mažiausias paviršius yra rutulio, todėl išorinių jėgų neveikiamas skystis pasidaro rutulio formos. Tokią formą stengiasi įgyti lietaus ir rasos lašai, gyvsidabrio lašeliai ant stiklo.

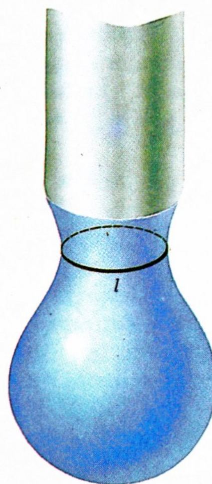
Stebėkite lašo susidarymą, lengvai spausdami pipetę, ir pamatysite nuostabų vaizdą — vandenį „nuosavame inde“ (14.2 pav.)! Ypač įdomu stebėti nuspalvinto vandens lašą, suprojektuotą ekrane: lašas vis didėja, virpa, susidaro sąsmauka — kaklelis — ir lašas atitrūksta — tampri skysčio paviršiaus plėvelė neišlaikė vandens svorio, skystis pats perplėšė savo „rūbą“.

§ 14.4. Skysčio paviršiaus įtempimas

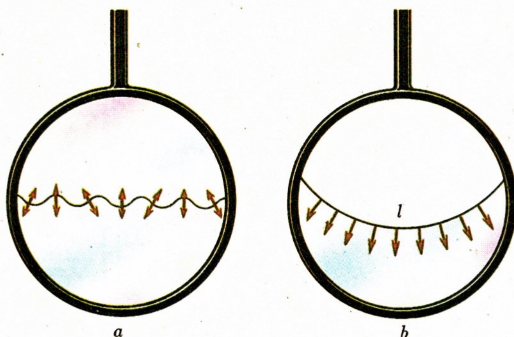
Vandens „rūbo“ stiprumo matavimas

Ant vielos rėmelio užriškime ties viduriu siūlą ir panardinkime į muilo tirpalą.

Susidariusią muilo tirpalo plėvelę (14.3 pav., *a*) vienoje siūlo pusėje pradurkime. Pamatysime, kaip besitraukdamas paviršius ištemps siūlą (14.3 pav., *b*). Jėga,



14.2 pav.



14.3 pav.

kuria besistengiantis susitraukti skysčio paviršius veikia jį ribojantį kontūrą, vadinama **paviršiaus įtempimo jėga.** Ji tuo didesnė, kuo ilgesnis ribojantis paviršių kontūras.

Jėgos F, kuria skysčio paviršius veikia kontūrą (šiuo atveju siūlą), *santykis su to kontūro ilgiu l vadinamas* **skysčio paviršiaus įtempimo koeficientu** (žymimas raide σ — sigma):

$$\sigma = \frac{F}{l}. \qquad (14.1)$$

Kaip matome formulėje, σ matuojamas N/m.

Įvairių skysčių paviršiaus įtempimo koeficientai surašyti VIII lentelėje.

Eksperimentais nustatyta, kad σ priklauso nuo temperatūros: temperatūrai kylant paviršiaus įtempimas mažėja.

Skysčio paviršiaus įtempimo jėgą F galima išmatuoti jautriu dinamometru, atplėšiant skersinėlį nuo skysčio paviršiaus (14.4 pav.). Tą jėgą padaliję iš skersinėlio ilgio l, rasime tiriamojo skysčio paviršiaus įtempimo koeficientą.

Pavyzdys. 30 lašų, išlašėjusių iš 14.2 paveiksle pavaizduotos pipetės, svėrė 0,55 g. Pipetės angos skersmuo 0,8 mm. Koks vandens paviršiaus įtempimo koeficientas?

S p r e n d i m a s. Lašas nuo pipetės nutrūksta tada, kai jo svoris $P = m_1 g$ atsveria paviršiaus įtempimo jėgą

$$F = \sigma l.$$

Taigi lašo atitrūkimo sąlyga:

$$P = F, \text{ t. y. } m_1 g = \sigma l;$$

iš čia

$$\sigma = \frac{m_1 g}{l}.$$

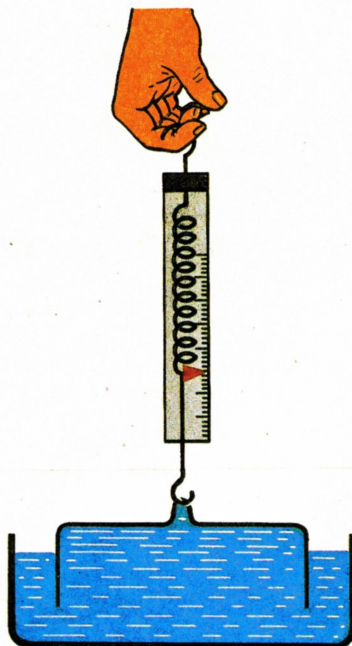
Reikalingi duomenys: m_1 — vieno lašo masė ir l — lašo kaklelio apskritimo ilgis.

Vieno lašo masė $m_1 = \frac{m}{30}$, o lašo kaklelio apskritimo ilgį apytiksliai laikykime lygiu pipetės angos apskritimo ilgiui: $l = \pi d$.

Taigi

$$\sigma = \frac{mg}{30\pi d} = \frac{0{,}55 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}8}{30 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}} \,\frac{\text{N}}{\text{m}} = 0{,}072 \,\frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Ats. σ = 0,072 N/m.

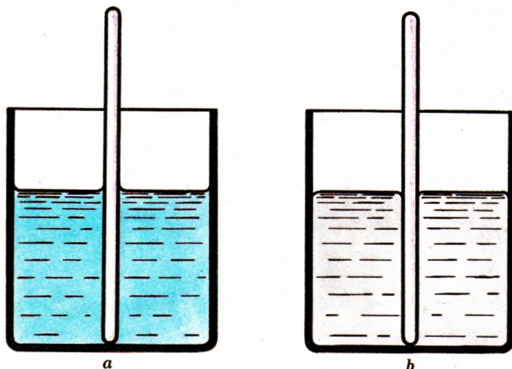


14.4 pav.

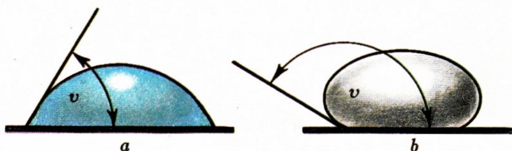
? *1. Kodėl milžiniškas molekulinis slėgis (11 000 at) nesutraiško vandenyje plaukiojančių žuvų?*
2. Kokią formą įgaus kosminiame laive vanduo, iškratytas iš indo?
3. Kieno — vandens ar spirito — lašai bus didesni, jei lašinsime iš tos pačios pipetės?

14.1. Matuojant vandens paviršiaus įtempimo koeficientą, aliumininis žiedas, pakabintas ant dinamometro, buvo nuleistas ant vandens paviršiaus, o po to atplėštas nuo jo. Žiedo masė 5,7 g, vidutinis skersmuo 200 mm. Dinamometras atplėšimo momentu rodė 0,15 N. Kokia gauta vandens paviršiaus įtempimo koeficiento vertė?

14.2. 537 g masės aliuminio gabalas buvo įkaitintas iki 200 °C ir įleistas į 400 g vandens, kurio temperatūra 16 °C. Dalis vandens išgaravo, o likusio temperatūra pakilo iki 50 °C. Kiek vandens išgaravo?



15.1 pav.



15.2 pav.

15 paskaita

KAIP VEIKIA BERŽO SULOS „SIURBLYS"?

§ 15.1. Drėkinimas

Įdomūs ir labai svarbūs fizikiniai reiškiniai vyksta skysčio ir kietojo kūno lietimosi riboje. Nesunku pastebėti, kad vanduo stiklinėje prie sienelės ir prie įmerktos stiklo lazdelės šiek tiek pakilęs, ištraukta iš vandens lazdelė šlapia (15.1 pav., *a*). Jeigu lazdelę ir stiklinės vidų patepsime riebalais, tai pamatysime atvirkščią reiškinį — vandens paviršius prie sienelių bus išlinkęs žemyn, ištraukta iš vandens lazdelė sausa. Tą pat pastebėsime ir įleidę švarią stiklinę lazdelę į gyvsidabrį (15.1 pav., *b*).

Į stiklinę arba plastmasinę lėkštę įlašinkime vandens ir gyvsidabrio. Pastebėsime, kad gyvsidabrio lašeliai apvalūs, ridinėjasi po lėkštę, o vandens — plokšti, prilipę prie dugno (15.2 pav.). Taigi skysčio ir kietojo kūno sąveika yra dvejopa.

Kodėl antis nešlampa?

Vienais atvejais, *kai skysčio ir kietojo kūno molekulių sąveika yra stipresnė už paties skysčio molekulių tarpusavio sąveiką, sakoma, kad skystis drėkina kietąjį kūną.* Priešingu atveju sakoma, kad skystis kietojo kūno *nedrėkina.* Tas pats skystis vienus kūnus drėkina, kitų — ne. Pavyzdžiui, vanduo drėkina stiklą, plastmasę, medį, bet palieka sausą vašką, parafiną, plastiliną ir kt. Gyvsidabris laisvai rieda per stiklą ir geležį, bet prilimpa prie aukso, vario, cinko, nes juos drėkina. *Drėkinantis skystis kyla prie indo sienelių ir pasklinda ant kietojo kūno paviršiaus. Nedrėkinantis skystis nusileidžia prie indo sienelių, o ant paviršiaus susitraukia į lašus.* Pirmuoju atveju kampas ϑ tarp skysčio paviršiaus liestinės ir sienelės yra smailus, antruo-

ju — bukas (15.2 pav.). Šis kampas ϑ vadinamas **sąlyčio kampu.**

Technikoje drėkinimas yra svarbus klijuojant, lituojant, dažant, suvirinant metalus ir kt.

Naudingųjų iškasenų sodrinimo būdas, pagrįstas skirtingu įvairių mineralų paviršiaus drėkinimu, liečiantis su įvairiais skysčiais, vadinamas **flotacija.** Rūda, iškasta kartu su priemaišomis, sumalama ir suplakama vandenyje su alyva. Rūdos dalelių vanduo nedrėkina, todėl jos apsitraukia plona alyvos plėvele, o uolienos gabalėliai sušlampa. Pučiant per tokią emulsiją orą, burbuliukai prilimpa prie alyva suvilgytų rūdos kruopelių ir jas iškelia į putas, o vandens suvilgytos priemaišų dalelės skęsta. Tokiu būdu gaunami vario, švino, cinko, molibdeno, sieros ir kitų naudingųjų iškasenų rūdų koncentratai.

Panašiai, vartojant muilo skiedinį, sodrinamas Anykščių smėlis: su putomis iškyla nereikalingos priemaišos, o nuosėdose lieka grynas kvarcinis smėlis, tinkamas lietuviškojo krištolo gamybai.

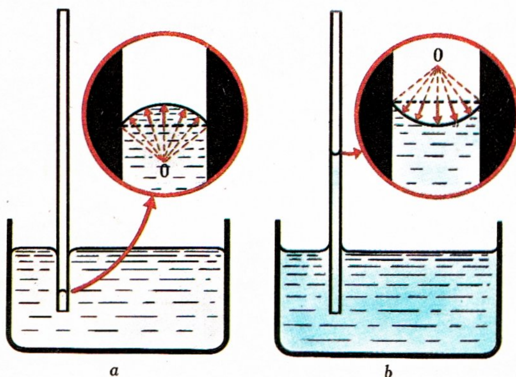
§ 15.2. Kapiliariniai reiškiniai

Dvejopa paviršiaus forma

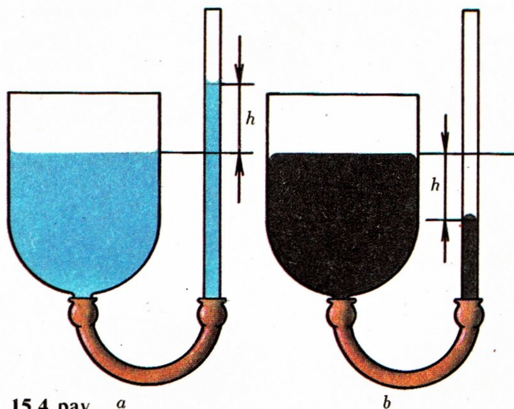
Drėkinantis skystis prie indo sienelių pakyla, o nedrėkinantis — nusileidžia, todėl skysčio paviršius nedideliame inde būna kreivas. Siaurame vamzdelyje drėkinančio skysčio paviršius tampa *įgaubtas,* o nedrėkinančio — *iškilas* (15.3 pav., *a, b*). Toks kreivas skysčio paviršius vadinamas **menisku** (gr. *meniskos* — pusmėnulis). Menisko kreivumas tuo didesnis, kuo mažesnis skysčio paviršius.

Meniskas ir molekulinis slėgis

Kreiva menisko forma negali neturėti įtakos skysčio paviršiaus slėgiui. Visos liestinių kryptimis veikiančios įtempimo jėgos sudaro atstojamąją jėgą, nukreiptą į kreivumo centrą, t. y. į skysčio vidų, kai meniskas iškilas (15.3 pav., *b*), arba išorėn, kai jis įgaubtas (15.3 pav., *a*). Pirmuoju atveju ši atstojamoji padidina skysčio paviršiaus slėgį vamzdelyje, o antruoju sumažina. Dėl šios priežasties nedrėkinantis skystis vamzdelyje nusileidžia, o drėkinantis pakyla tiek, kad hidrostatinio slėgio pokytis dėl pakitusio stulpelio aukščio atsveria slėgio pokytį Δp. Štai kodėl siauruose induose nustoja galiojusi susisiekiančiųjų indų taisyklė (15.4 pav.).



15.3 pav.



15.4 pav.

1806 m. prancūzų mokslininkas Pjeras Laplasas (1749—1827) išvedė menisko sudaromo slėgio formulę:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}; \qquad (15.1)$$

čia r — menisko kreivumo spindulys. Šis slėgis vadinamas **Laplaso slėgiu.**

Laplaso slėgį vaizdžiai iliustruoja toks paprastas bandymas. Išpūskime šiaudeliais du skirtingo dydžio muilo burbulus ir suverkime šiaudelių galus vieną į kitą (15.5 pav.). Pamatysime, kad mažasis burbulas mažėja, o didysis didėja! Taip ir turėjo būti, nes mažesniajame didesnis Laplaso slėgis — jis gi atvirkščiai proporcingas burbulo spinduliui.

Be kojų be rankų siena lipa

Skysčio pakilimas arba nusileidimas ypač ryškus vamzdeliuose su labai plonomis kiaurymėmis — kapiliaruose (lot. *capillaris* — plaukinis). Kuo plonesni kapiliarai, tuo ryškesni aprašytieji **kapiliariniai reiškiniai.** Skysčio pakilimo arba nusileidimo aukštį kapiliariniame vamzdelyje nesunku apskaičiuoti. Pusiausvyros sąlyga kapiliariniame vamzdelyje paprasta: drėkinantis skystis nustoja „kopęs" kapiliaru aukštyn tada, kai papildomo stulpelio sunkis $P = mg$ kompensuoja paviršiaus įtempimo jėgą $F = \sigma l$:

$$P = F, \text{ t. y. } mg = \sigma l.$$

Skysčio stulpelio kapiliare masė $m = \varrho V$; čia ϱ — skysčio tankis, o V — tūris. Skysčio geometrinė forma kapiliare — ritinys, taigi $V = \pi r^2 h$. Skysčio lietimosi riba — kapiliaro apskritimas, kurio ilgis $l = 2\pi r$. Įrašę šias išraiškas į lygybę, gausime:

$$\varrho \pi r^2 h g = 2\pi r \sigma.$$

Iš čia drėkinančio skysčio pakilimo kapiliare aukštis

$$h = \frac{2\sigma}{\varrho r g}. \qquad (15.2)$$

Skysčio pakilimo aukštis kapiliare yra tiesiog proporcingas paviršiaus įtempimo koeficientui ir atvirkščiai proporcingas kapiliaro spinduliui ir skysčio tankiui.

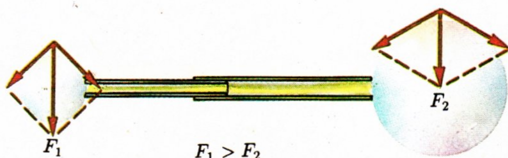
Pagal tą pačią formulę apskaičiuojamas ir nedrėkinančio skysčio nusileidimo kapiliare gylis.

Mažieji siurbliai

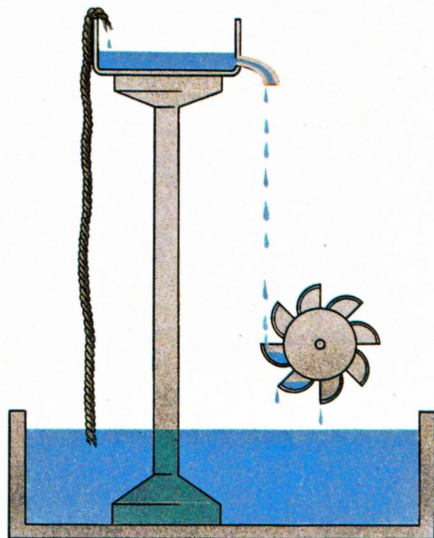
Kapiliarinių reiškinių gausu gamtoje, technikoje ir mūsų kasdieniniame gyvenime. Smulkiausiais kapiliarais, esančiais augalų audiniuose, kyla iš dirvos vanduo, nešdamas ištirpusias maistingąsias medžiagas. Karštą vasaros dieną beržas išsiurbia šaknimis iš žemės, pakelia kamienu ir pro lapus išgarina 5—6 kibirus vandens.

Dirvos struktūra taip pat kapiliarinė. Plonyčiai kanalai tarp grumstelių atstoja kapiliarinius vamzdelius, kuriais vanduo kyla į paviršių ir garuoja. Saulėtą vasaros dieną iš kiekvieno hektaro žemės tokiu būdu gali išgaruoti apie 10 t vandens. Todėl, norint sulaikyti dirvoje drėgmę, reikia suardyti žemės paviršiaus kapiliarus — purenti dirvą. Kita vertus, norint podirvio vandenį pakelti aukščiau, prie šaknų, reikia dirvos kapiliarus susiaurinti. Šiam tikslui laukai voluojami.

Plytos, betonas ir kitos statybinės medžiagos yra akyti kūnai, turi išsišakojusią kapiliarų sistemą. Dėl to pastatų sienos ir pamatai apsaugomi nuo podirvio vandenų hidroizoliacinėmis medžiagomis, neturinčiomis kapiliarų.



15.5 pav.



15.6 pav.

Buitiniai reikmenys — rankšluostis, vata, sugeriamasis popierius, kempinė savo paskirtį atlieka irgi tik todėl, kad turi kapiliarinę struktūrą. Žvakės dagties kapiliarais kyla aukštyn ir maitina liepsną ištirpęs vaškas.



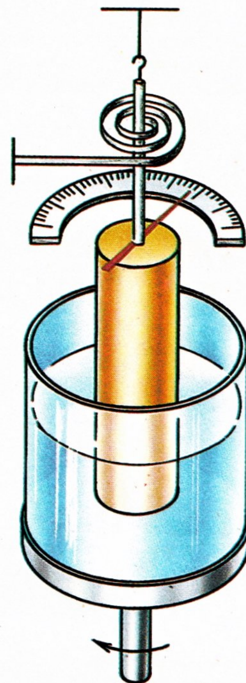
Simas Klaidelė sukūrė kapiliarinio amžinojo variklio projektą (15.6 pav.): „Iš apatinio baseino storų dagčių kapiliarais vanduo kils aukštyn ir tekės į viršutinį indą, o krisdamas žemyn suks ratą. Po to, ..." (skaityk projekto aprašymą iš pradžių). Kur šio projekto klaida?

§ 15.3. Vidinė trintis skysčiuose (klampumas)

Dar viena labai savita skysčių savybė yra jų klampumas. *Klampumu vadinama skysčio savybė priešintis jo sluoksnių judėjimui vienas kito atžvilgiu.* Skysčiuose nėra rimties trinties — ramiame vandenyje sunkiausią plaustą pastumsime nedidele jėga. Tačiau judančiuose skysčiuose veikia vidinės trinties, arba klampumo, jėgos. Sukime indą su skysčiu (15.7 pav.) ir pamatysime, kaip įsisuks paniręs ties indo centru ant siūlo kabantis ritinėlis. Pritaisius ritinėlio sukimuisi besipriešinančią spyruoklę, galima išmatuoti skysčio vidinės trinties jėgą. Ši jėga priklauso nuo skysčio sluoksnio storio, nuo išorinio indo sukimosi greičio, skysčio rūšies ir temperatūros. Aprašytojo prietaiso principu sukonstruotas **rotacinis klampomatis** (viskozimetras).

Skysčio klampumą galima išmatuoti ir **rutuliukiniu klampomačiu**, palyginant laiką, per kurį specialus rutuliukas nugrimsta į tam tikrą gylį.

Įvairių skysčių klampumui palyginti įvedamas **klampumo koeficientas.** Jo matavimo vienetas SI sistemoje — paskalsekundė (Pa·s).



15.7 pav.

Klampumą svarbu žinoti skaičiuojant energiją, reikalingą skysčiams varyti vamzdžiais, projektuojant vamzdynus, aušinimo ar šildymo tekančiais skysčiais įtaisus ir kt.

Plonu klampaus skysčio sluoksniu atskiriamos, t. y. tepamos besitrinančios mašinų ir mechanizmų dalys.

?

1. Kiek pakils vanduo 1 m ilgio ir 0,5 mm skersmens kapiliariniame vamzdelyje kosminiame laive nesvarumo sąlygomis?

2. Per pasėtų miežių lauką pravažiavo sunkvežimis. Kodėl sausą vasarą tik vėžėse subujojo vešlūs javai?

3. Kokio skysčio galima pripilti į stiklinę aukščiau kraštų?

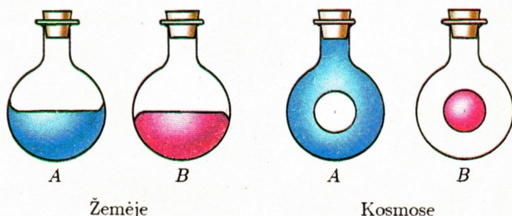
4. Pamąstykite, kuo drobiniai marškiniai geresni už nailoninius.

5. Inde su vandeniu plūduriuoja celuloidinis stalo teniso kamuoliukas. Palietus vandens paviršių cukraus gabaliuku, kamuoliukas priplauks prie jo, palietus muilo gabaliuku — nutols. Kodėl?

6. Induose A ir B (15.8 pav.) užkimšti skirtingi skysčiai. Kodėl kosmose nesvarumo sąlygomis jų forma tapo tokia, kaip pavaizduota paveiksle?

15.1. Kiek pakils vanduo ir žibalas ir kiek nusileis gyvsidabris kapiliariniu vamzdeliu, kurio kanalo skersmuo 0,20 mm, kambario temperatūroje?

15.2. U formos kapiliarinio vamzdelio dešiniosios šakos skersmuo lygus 1 mm, o kairiosios 0,2 mm. Koks bus lygių skirtumas, įpylus į vamzdelį vandens, žibalo, gyvsidabrio? Koks yra sotaus vario sulfato tirpalo paviršiaus įtempimo koeficientas, jeigu jo lygių skirtumas tame vamzdelyje 105 mm?



15.8 pav.

1.6 skyrius
KIETŲJŲ KŪNŲ SAVYBĖS

16 paskaita
TILTAS TARP NEGYVOSIOS IR GYVOSIOS GAMTOS

§ 16.1. Kietieji kūnai

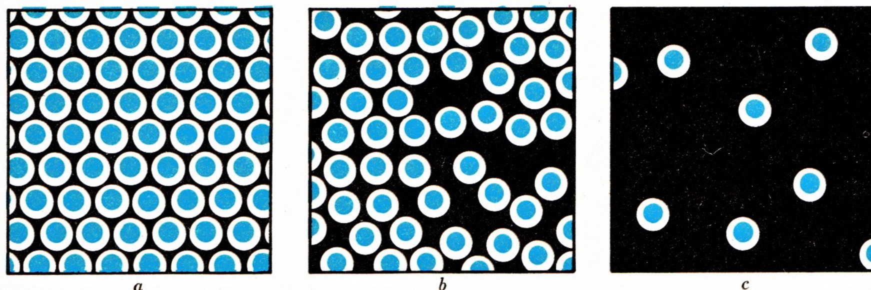
Kietaisiais fizikoje vadinami kūnai, išlaikantys savo tūrį ir formą.

Mokslo ir gamybos pažanga didžia dalimi priklauso nuo reikalingas savybes turinčių kietųjų medžiagų, todėl kietojo kūno tyrimams fizikoje skiriamas ypatingas dėmesys. Bemaž pusė pasaulio fizikų šiuo metu užsiima *kietojo kūno fizika* — tiria kietųjų medžiagų struktūrą ir jos ryšį su mechaninėmis, elektrinėmis ir magnetinėmis, optinėmis savybėmis, kietuosiuose kūnuose vykstančius reiškinius.

Kietieji kūnai gali būti **kristaliniai** arba **amorfiniai.**

Kristalai (gr. *krystallos* — ledas, krištolas) — *tai kietieji kūnai, kuriems būdinga taisyklinga geometrinė forma; ją lemia periodiškas dalelių išsidėstymas kristalo viduje.* Kristalą sudarančių dalelių — atomų, molekulių ar jonų — taisyklingas išsidėstymas periodiškai kartojasi šimtus ir tūkstančius kartų, todėl sakoma, kad kristaluose yra **tolimoji tvarka** (16.1 pav., *a*).

Neturintieji kristalinės struktūros kietieji kūnai vadinami **amorfiniais** (gr. *amorphos* — beformis). Amorfines medžiagas (vašką, parafiną, gintarą, stiklą) galima laikyti net ne kietaisiais kūnais, o didelio klampumo skysčiais, nes jų dalelių išsidėstymui būdinga tik *artimoji tvarka* (16.1 pav., *b*), ir jie turi skysčio savybių (pvz., derva, ilgai veikiama slėgio, teka).



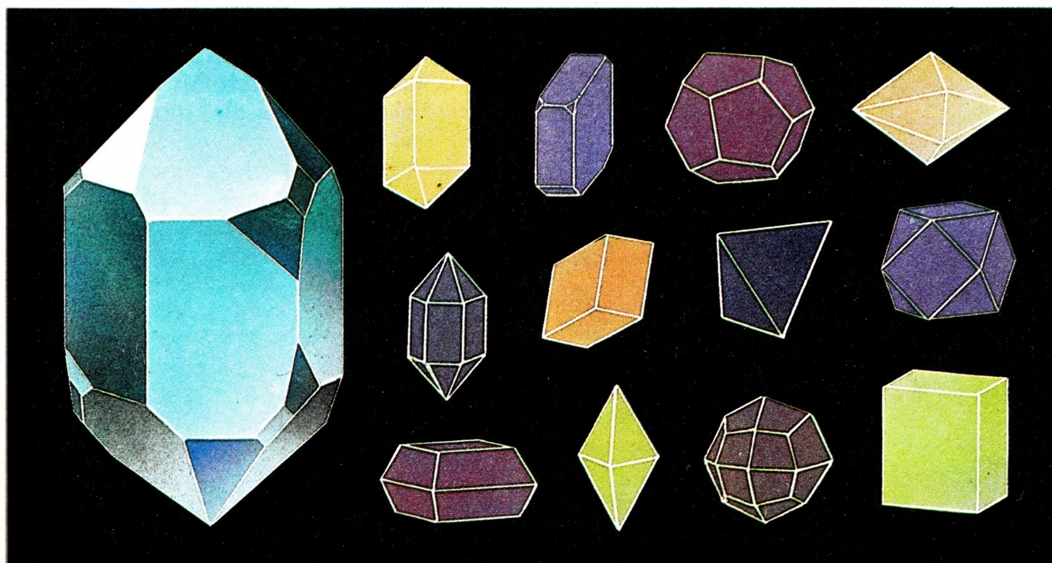
16.1 pav.: *a* — **kietoji medžiaga, tolimoji tvarka;** *b* — **skystis, artimoji tvarka;** *c* — **dujos, tvarkos nėra**

§ 16.2. Kristalų anizotropija

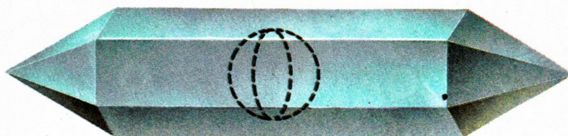
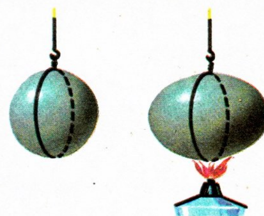
Dvi kristalų rūšys

Kristalų susidarymą, vidinę struktūrą ir formą, fizines ir chemines savybes tirianti mokslo šaka vadinama **kristalografija.**

Kai kurios medžiagos (kvarcas, žėrutis, deimantas, įvairios druskos) gali sudaryti stambius gražių taisyklingų formų pavienius kristalus — **monokristalus** (gr. *monos* — vienas) (16.2 pav.). Tačiau dauguma kietųjų kūnų (metalai, cukrus, granitas, gipsas ir kt.) yra sudaryti iš daugybės labai smulkių chaotiškai išsidėsčiusių ir tarpusavyje suaugusių kristaliukų, todėl vadinami **polikristalais** (gr. *polys* — gausus).



16.2 pav.

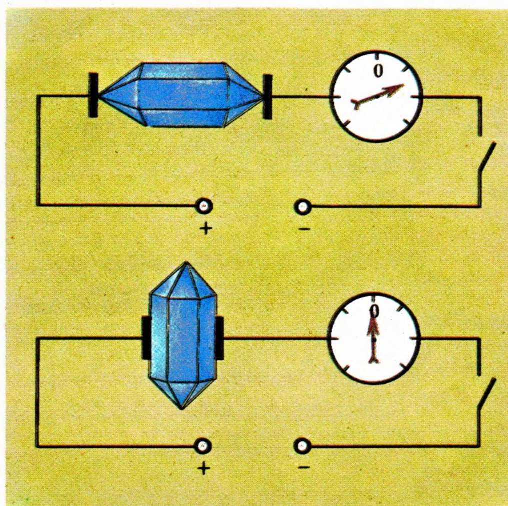
16.4 pav.

Stebėtini reiškiniai monokristaluose

Tyrinėjant įvairias medžiagas, niekados iki šiol nekilo mintis, kad kūno fizikinės savybės gali priklausyti nuo krypties. Tačiau taip yra monokristaluose: įvairiomis kryptimis jie nevienodai praleidžia šilumą, elektrą, šviesą ir garsą, nevienodai skyla nuo smūgių, plečiasi šildomi ir kt. Ši monokristalų savybė vadinama **anizotropija.**

Įjunkime į elektros grandinę sieros kristalą įvairiose padėtyse ir įsitikinsime, kad jis laidus elektrai tik viena kryptimi (16.3 pav.). Iš kvarco kristalo išpjautas rutulys pakaitintas virsta sukimosi elipsoidu (16.4 pav.) — tai rodo, kad šio kristalo šiluminis plėtimasis įvairiomis kryptimis skirtingas.

Nudaužytomis briaunomis ar viršūnėmis kristalas, įleistas į persotintą tos medžiagos tirpalą, „užsigydo žaizdas",— atstato buvusią taisyklingą formą.



16.3 pav.

§ 16.3. Vidinė kristalų sandara

„Blokinė" kristalinių kūnų struktūra

Peršvietus įvairius kristalus Rentgeno spinduliais (§ 55.1) paaiškėjo, kad išorinę kristalo formą lemia vidinė jo struktūra — atomų, molekulių ar jonų išsidėstymas. Dalelės kristaluose išsidėsčiusios tvarkingai: lygiais tarpais tam tikromis eilėmis, geometrinėmis figūromis plokštumose ar erdvėje. Jos sudaro daug kartų pasikartojančią taisyklingos geometrinės formos **erdvinę gardelę.** Tai — kristalo struktūriniai elementai, tarsi blokai, iš kurių sumontuotas visas kristalas.

Įvairių kristalų gardelės skirtingos. Pavyzdžiui, natrio, chromo, geležies gardelės yra kubo formos (16.5 pav., *a*), cinko, magnio ir daugelio lydinių — šešiasienės stačiosios prizmės (16.5 pav., *b*), Islandijos špato — rombaedro (16.5 pav., *c*) formos. Gali būti 230 įvairių kristalo erdvinės gardelės formų.

Skirtingos rikiuotės

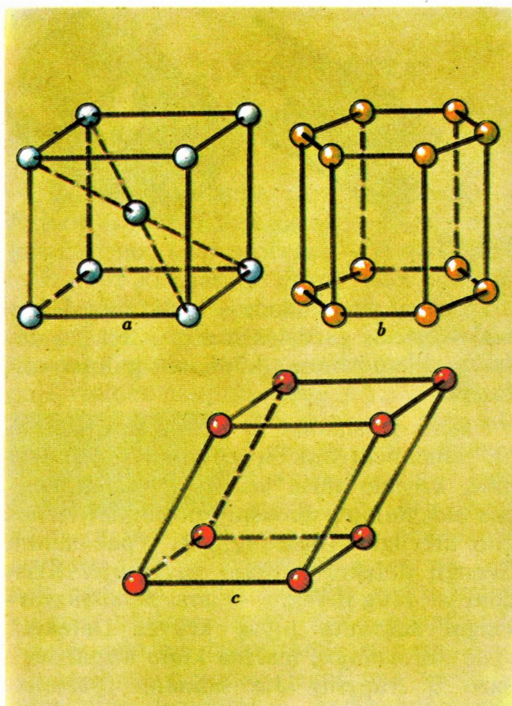
Nuo erdvinės gardelės formos priklauso ir kristalinės medžiagos fizikinės savybės. Pa-

vyzdžiui, ir juodas, minkštas, laidus elektrai grafitas, kuriuo rašome, ir labai kietas, skaidrus brangakmenis deimantas, ir paprasčiausi suodžiai yra to paties elemento — anglies — atmainos. Skiriasi šios medžiagos tik anglies atomų išsidėstymu — kristalinės gardelės forma (16.6 pav., *a*, *b*). Kai kurių medžiagų gebėjimas kristalizuotis keliomis formomis vadinamas **polimorfizmu.**

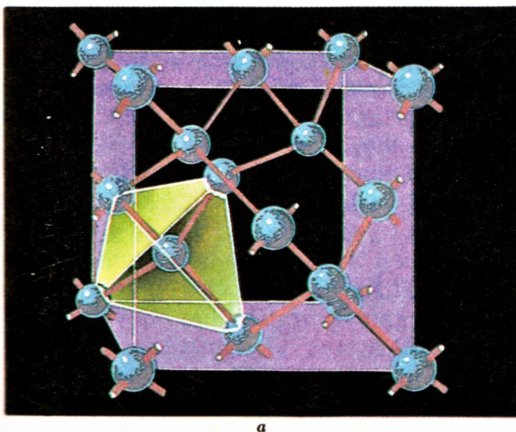
Klaidos gamtos mozaikose

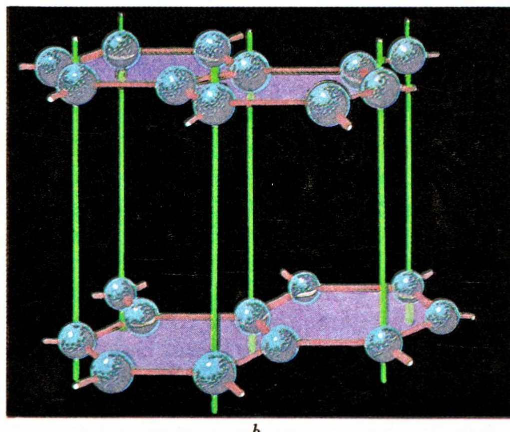
Didelę įtaką kristalų savybėms daro įvairūs jų vidinės struktūros **defektai.** Dėl jų mažėja kristalų mechaninis stiprumas, skaidrumas, kinta varža, kitos savybės.

Taškiniai defektai — tai paskiri priemaišų atomai, įsiterpę arba specialiai įterpiami tarp kristalo gardelės mazgų arba įsikūrę mazguose vietoj pagrindinės medžiagos atomų. Vos 0,01 % priemaišų germanio arba silicio kristaluose šimtus kartų sumažina jo elektrinę varžą. Tačiau kai kurios priemaišos padidina kristalų tvirtumą, todėl, lydant atsparius plienus, į juos specialiai įmaišoma priedų (nikelio, volframo, kobalto ir kt.).

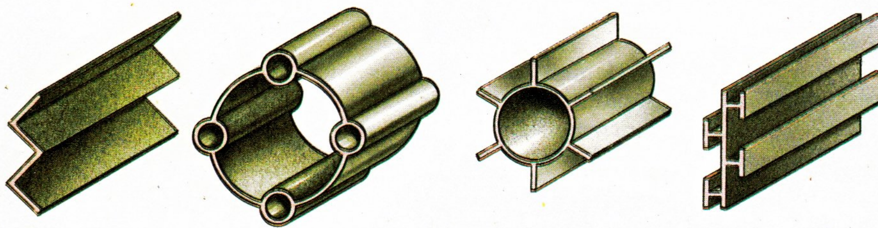


16.5 pav.





16.6 pav. Anglies kristalinės gardelės: *a* **— deimanto,** *b* — grafito



16.7 pav.

Dažnai pasitaikantis taškinis defektas — tuščias gardelės mazgas. Dėl šių defektų kietuosiuose kūnuose galima difuzija.

Būna kristaluose ir stambesnių defektų, apimančių dalelių grandinėles, sluoksnius, kristalo tūrio sritis — plyšiai, nepilnos plokštumos, sluoksnių poslinkiai vienas kito atžvilgiu (dislokacijos). Ypač sunku išvengti defektų kristalo paviršiuje. Kristalas su daug defektų — tarsi nelabai tvarkingai sukrauta plytų krūva. Defektai, ypač dislokacijos, mažina kūno atsparumą, daro jį trapesnį. Jie šalinami specialiai apdorojant medžiagas.

§ 16.4. Kristalų auginimas

Mokslo ir technikos reikalams reikia labai daug grynų kristalų, kur kas daugiau negu jų įmanoma rasti gamtos sandėliuose. Kristalai yra visos puslaidininkinės elektronikos pagrindas. Iš jų gaminamos radioelektronikos detalės — tranzistoriai, mikroschemos, atminties elementai skaičiavimo mašinoms, lazeriai. Kristalai naudojami gręžiant uolienas, užrašant ir atgaminant gąrsą, matuojant temperatūrą ir slėgį. Panaudojęs dirbtinai išaugintą rubino kristalą amerikietis T. Melmanas 1960 m. sukonstravo pirmąjį pasaulyje lazerį (§ 59.2). Kristalai žėri juvelyriniuose dirbiniuose. Todėl kristalų auginimas tapo labai išvystyta šiuolaikinės pramonės šaka. Pavyzdžiui, šiuo metu 95 % įrankių su deimantinėmis dalimis gaminami iš sintetinių deimantų.

Kristalų „inkubatoriai“

Pramonėje kristalai auginami specialiuose automatizuotuose termostatuose. Pagal iš anksto sudarytą programą galima įterpti reikiamose kristalo vietose priemaišų, keisti kristalo savybes ir išauginti ištisą kristalinį prietaisą.

Yra išrasta būdų, kaip užauginti monokristalus iš karto reikiamos formos — juostos, siūlo, vamzdelio, bet kokio sudėtingo profilio (16.7 pav.).

Didžiules galimybes atveria kosminė kristalų auginimo technologija. Nesvarumo ir gilaus vakuumo sąlygomis buvo išauginti tobuli monokristalai, dešimt kartų didesni negu žemės sąlygomis. Kosmose išauginami kristalai be priemaišų, šimtus kartų patvaresni už randamus žemėje.

§ 16.5. Skystieji kristalai

Skystieji kristalai — tai skystos organinės medžiagos, turinčios anizotropinių savybių, kaip kristalai. Šias savybes skystasis kristalas turi tik tam tikrame temperatūrų intervale: aukštesnėje temperatūroje jis virsta paprastu skysčiu, žemesnėje — kietuoju kristalu.

Skystųjų kristalų savybes lemia vidinė struktūra. Jų molekulės yra ištęstos, pa-

ilgos, todėl gali orientuotis lygiagrečiomis eilutėmis, sluoksniais arba kitokia tvarka. Dėl to skystis ir pasidaro anizotropiškas, tarsi monokristalas — jo optinės, elektrinės, magnetinės savybės pasidaro priklausomos nuo krypties. Paveikus tokį skystį, pavyzdžiui, elektriniu lauku, molekulės pasisuka ir taip susitvarko, kad pakinta jo optinės savybės — iš neskaidraus skystis tampa skaidriu, iš skaidraus — neskaidriu arba net spalvotu. Šiuo pagrindu sukurti skystųjų kristalų tablo ir skaitmeniniai indikatoriai laikrodžiams, kalkuliatoriams ir kt.

Kai kurie skystieji kristalai keičia savo spalvą priklausomai nuo temperatūros: pavyzdžiui, aukštoje temperatūroje būna bespalviai, o aušdami pradeda palaipsniui šviesti visomis spektro spalvomis, ryškiomis ir grynomis, nuo violetinės iki raudonos. Šiuo principu sukurti paprasti ir tikslūs termometrai. Skystųjų kristalų spalvą galima valdyti ir silpna įtampa. Jų pagrindu kuriami nespalvoto ir spalvoto vaizdo plokšti televizorių ekranai.

Skystieji kristalai labai jautrūs mechaniniam slėgiui, dujų priemaišoms, radioaktyviesiems spinduliams ir kt. Tai atveria įvairiausias galimybes juos naudoti praktikoje; visas jas sunku ir numatyti.

Lietuvoje skystuosius kristalus sintetina ir tiria Vilniaus universiteto, Pedagoginio universiteto, Elektrografijos mokslinio tyrimo instituto fizikai bei chemikai.

? *1. Kas atsitiks kristalui, įdėjus jį į nesotųjį tirpalą; į persotintą tirpalą?*
2. Kaip įrodyti (neatliekant eksperimento), kad kristalas auga persotintame tirpale įvairiomis kryptimis skirtingais greičiais?
Tema referatui: *„Skystieji kristalai ir jų pritaikymas“.*

---

17 paskaita

„KALK GELEŽĮ KOL KARŠTA“

§ 17.1. Kietųjų kūnų deformacijos

Žodis **deformacija** (lot. *deformatio* — formos keitimas) fizikoje suprantamas dvejopai: pirma, kaip procesas — kūno dydžio ir formos kitimas, ir antra, kaip to proceso padarinys — kūno dalių poslinkis, matuojamas fizikinis dydis. Kūną deformuojant visuomet ima veikti jo medžiagoje vidinės pasipriešinimo jėgos.

Prisiminkime

Prisiminkime, kaip aiškinamos, mokantis mechaniką, vidinių jėgų atsiradimo priežastys. Kūną deformavus, pavyzdžiui, ištempus, atstumai tarp jo molekulių ar atomų šiek tiek padidėja, todėl pradeda veikti molekulinės *traukos jėgos.* Kūną suspaudus, dalelės suartėja ir atsiranda *stūmos jėgos.* Tos pačios prigimties jėgos ima veikti ir kūne, kurį lenkiame arba susukame, nes ir čia pakinta dalelių tarpusavio padėtys. Šios vidinės jėgos stengiasi grąžinti deformuotam kūnui pradinę formą ir matmenis. Jos vadinamos **tamprumo jėgomis.**

Jeigu, nustojus veikti deformuojančiai jėgai, kūno forma ir matmenys atsistato, tai tokia deformacija vadinama **tampriąja.** Jeigu, nustojus veikti išorinei jėgai, kūnas lieka deformuotas, tai deformacija vadinama **plastine.** Plastinės deformacijos sutrikdo normalų mašinų, įrenginių konstrukcijų darbą, todėl jos yra neleistinos.

Toliau nagrinėsime tik tampriąsias deformacijas, tiksliau sakant, tik mažas deformacijas, kurioms tinka mums jau žinomas Huko dėsnis. Mechanikos kurse jis buvo suformuluotas tempimo ir gniuždymo deformacijoms, o dabar pateiksime bendresnę Huko dėsnio formuluotę.

Deformuoto kūno matmenų pokytis

vadinamas **absoliutine deformacija** (Δx). **Huko dėsnis** teigia: *deformuoto kūno tamprumo jėga yra proporcinga absoliutinei deformacijai ir veikia jai priešinga kryptimi:*

$$F = k\Delta x. \qquad (17.1)$$

Proporcingumo koeficientas k vadinamas **tamprumo koeficientu.**

Jau žinomą tampriai deformuoto kūno potencinės energijos formulę dabar rašysime:

$$E_p = \frac{k(\Delta x)^2}{2}. \qquad (17.2)$$

Absoliutinė deformacija neparodo, ar labai kūnas deformuotas. Pavyzdžiui, jei ištįso 1 cm dvi virvelės, kurių ilgis 10 cm ir 10 m, tai jos deformavosi nevienodai. Todėl vartojama **santykinės deformacijos** sąvoka. *Absoliutinės deformacijos santykis su pradiniu kūno matmeniu vadinamas santykine deformacija* (ε).

§ 17.2. Deformacijų rūšys

Atsižvelgdami į tai, kaip veikia deformuojamą kūną išorinės jėgos, visas deformacijas galima suskirstyti į keturias rūšis: *tempimas* ir *gniuždymas, šlytis, sąsūka* ir *lenkimas.*

Tempimas ir gniuždymas

Dvi priešingų krypčių jėgos, veikiančios išilgai vienos tiesės, sukelia **tempimo** deformaciją (17.1 pav., *a, b*). Taip deformuojami kėlimo ir traukimo lynai bei grandinės, muzikos instrumentų stygos, žmogaus raumenys ir sausgyslės. Tempiami kūnai pailgėja, o skerspjūvio plotas sumažėja.

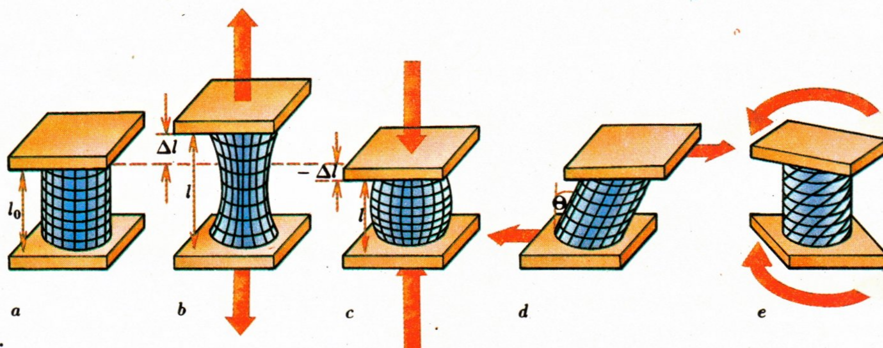
Sakykime, pradinis kūno ilgis yra lygus l_0, o deformavus tapo lygus l. Absoliutinė deformacija $\Delta l = l - l_0$ šiuo atveju vadinama **absoliutiniu pailgėjimu,** o santykinė — **santykiniu pailgėjimu:**

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \qquad (17.3)$$

Priešinga tempimui deformacija — kai jėgos veikia priešpriešiais — vadinama **gniuždymu** (17.1 pav., *a, c*). Šiuo atveju absoliutinė ir santykinė deformacijos yra neigiamos. Gniuždomos yra pastatų atraminės kolonos, sienos ir pamatai, medžių kamienai, kojų kaulai ir kt.

Ardantis „slydimas“

Kai dvi lygiagrečios priešingų krypčių jėgos veikia kūną ne vienoje tiesėje, atsiranda **šlyties** deformacija — kūno sluoksniai pasislenka lygiagrečiai vieni kitų atžvilgiu (17.1 pav., *a, d*). Absoliutinė deforma-



17.1 pav.

cija šiuo atveju įvertinama **šlyties kampu** Θ. Santykinė deformacija šiuo atveju yra tg Θ:

$$\varepsilon = \operatorname{tg} \Theta. \qquad (17.4)$$

Šlyties deformacija veikia uolienas ir ledynus kalnų šlaituose, detales jungiančius varžtus ir kniedes, kūnus, judančius veikiant didelei trinčiai.

Šlyties deformacijas atlieka kaltas, kirstukas, skreperio ir buldozerio peiliai, žirklės.

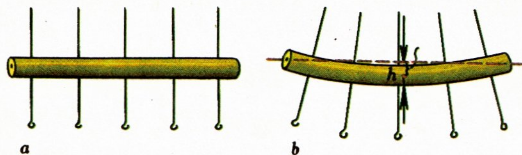
Ką reiškia „sukti galvą" fizikoje?

Mašinų velenus, varančiųjų ratų ašis, grąžtus, įsukamus varžtus ar medvaržčius veikia **sąsūkos** deformacija. Ji atsiranda, kai negalintį laisvai suktis kūną veikia dvi jėgos, sukančios priešingomis kryptimis (17.1 pav., *a, e*). Kūno sąsūką galima nagrinėti kaip savotišką šlyties deformaciją — statmenų sukimo ašiai plonų sluoksnių posūkį vienas kito atžvilgiu.

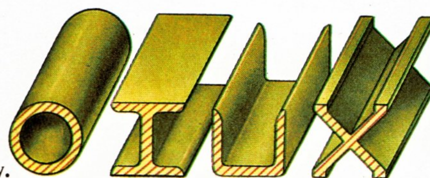
Kodėl rugio stiebas tuščiaviduris?

Abiejuose arba viename gale įtvirtintas vamzdis, horizontaliai įtemptas laidas įlinksta nuo savo svorio arba papildomai veikiančios statmenos jo ašiai jėgos. Modelį lenkimo deformacijai stebėti galime padaryti persmeigę vinimis vienodais nuotoliais plastmasinį vamzdelį (17.2 pav., *a, b*). Lenkimo deformaciją apibūdina atstumas *h*, vadinamas **įlinkiu.** Matome, kad išlenkto modelio iškiloji pusė pailgėjo, ištįso, o įgaubtoji pusė sugniužo, sutrumpėjo. Taigi lenkimo deformaciją sudaro vienų kūno dalių tempimas, kitų gniuždymas. Vidury tarp deformuotų sluoksnių esanti medžiaga beveik nepatiria jokios deformacijos — tai *neutralus sluoksnis,* nesipriešinantis deformacijai, tik papildomai apkraunantis konstrukcijas savo svoriu.

Dėl šios priežasties technikoje toms konstrukcijoms, kurias veikia lenkiančios



17.2 pav.



17.3 pav.

jėgos, vietoj ištisinių sijų ar strypų naudojami tuščiaviduriai vamzdžiai, dvitėjinio ir kitokio ekonomiško profilio sijos (17.3 pav.). Dėl to konstrukcijos palengvėja ir atpinga.

Prietaisai kietųjų kūnų deformacijoms matuoti vadinami **tenzometrais.**


Į paskutinės antraštėlės klausimą Simas Klaidelė atsakė: „...Todėl, kad toks stiebas pigesnis!.."

---

§ 17.3. Mechaninės kietųjų kūnų savybės

Mechaninis įtempimas

Jau kalbėjome, kad deformuojant kūną atsiranda besipriešinančios deformacijai tamprumo jėgos. *Deformuotame kūne veikiančios tamprumo jėgos F ir kūno skerspjūvio ploto S santykis vadinamas* **mechaniniu įtempimu:**

$$\sigma = \frac{F}{S}. \qquad (17.5)$$

Mechaninio įtempimo SI vienetas — paskalis:

$$\frac{1\ \mathrm{N}}{1\ \mathrm{m}^2} = 1\ \mathrm{Pa}.$$

17.1. Kokio skersmens turi būti keliamojo krano kablio strypas, kad, keliant 25 kN krovinį, įtempimas nebūtų didesnis kaip $6{,}0 \cdot 10^7$ Pa? ($v =$ const).

Vėl Huko dėsnis!

Žinodami mechaninio įtempimo ir santykinės deformacijos sąvokas, galime išvesti Huko dėsnio tempimo deformacijai formulę, patogią įtempimams inžinerinėse konstrukcijose skaičiuoti.

Į Huko dėsnio formulę (17.1) įrašykime jėgos F išraišką iš (17.5) lygybės, o absoliutinę deformaciją išreikškime santykine, naudodamiesi (17.3) formule. Gauname:

$$\sigma S = k l_0 \varepsilon,$$

arba

$$\sigma = \frac{k l_0}{S} \varepsilon.$$

Matome, kad *mechaninis įtempimas yra tiesiog proporcingas santykiniam pailgėjimui.* Šioje lygybėje esantis proporcingumo koeficientas $\frac{k l_0}{S}$ žymimas raide E ir vadinamas medžiagos **tamprumo moduliu**, arba **Jungo moduliu:**

$$E = \frac{k l_0}{S}. \qquad (17.6)$$

Dabar galime parašyti:

$$\sigma = E \varepsilon. \qquad (17.7)$$

Iš šios Huko dėsnio išraiškos galime išvesti formulę, patogią deformacijai skaičiuoti. Į (17.7) formulę įrašę σ ir ε išraiškas, gauname:

$$\frac{F}{S} = \frac{E \Delta l}{l_0}; \qquad (17.8)$$

iš čia

$$\Delta l = \frac{F l_0}{S E}. \qquad (17.9)$$

Jungo modulis apibūdina jau ne kokio nors kūno (kaip koeficientas k), o *medžiagos* tamprumą, yra medžiagos fizikinė konstanta. Kuo tampresnė medžiaga, tuo mažiau ji deformuojasi, veikiama tokio pat įtempimo. Nesunku įsitikinti, kad Jungo modulio vienetas yra $\frac{1\ \text{N}}{1\ \text{m}^2} = 1$ Pa. Įvairių medžiagų tamprumo moduliai surašyti IX lentelėje.

Dvi svarbios deformacijų ribos

Didžiausias įtempimas, kuriam veikiant dar neatsiranda plastinės deformacijos, vadinamas **tamprumo riba** (σ_t). Huko dėsnis galioja tik iki tamprumo ribos. Projektuojant mechanizmus, mašinas, konstrukcijas, žiūrima, kad jiems dirbant susidarantys įtempimai nesiektų tamprumo ribos — neatsirastų plastinių deformacijų.

Mažiausias įtempimas, kurio veikiamas kūnas suyra, vadinamas **stiprumo riba** (σ_s). Technikoje, atsižvelgiant į saugumo reikalavimus, nustatomi leistini konstrukcijų, mašinų detalių įtempimai, kelis ar keliolika kartų mažesni už jų stiprumo ribą. Skaičius n, rodantis, kiek kartų stiprumo riba σ_s yra didesnė už leidžiamą įtempimą σ_l, vadinamas **stiprumo atsarga:**

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_l}. \qquad (17.10)$$

Stiprumo atsarga priklauso nuo objekto paskirties ir nuo apkrovos pobūdžio. Pavyzdžiui, namų sienoms pakanka stiprumo atsargos vertės 3—4, keliamųjų kranų konstrukcijoms, tiltams, bokštams 6—7, o lėktuvų propeleriams, judančioms variklių detalėms, patrankų vamzdžiams ji turi siekti 8—10.

▲ **17.2.** Ant 3,0 cm^2 skerspjūvio ploto plieninio strypo užkabintas 7,5 t masės krovinys. Kokia yra stiprumo atsarga, jeigu tos markės plieno ardančioji apkrova $6{,}0 \cdot 10^8$ Pa? Į strypo masę neatsižvelgiama.

Trapumas ir kietumas

Kai kurių medžiagų beveik neįmanoma deformuoti plastiškai, nes nuo nedidelės tampriosios deformacijos jos subyra. Tokios medžiagos (grūdintas plienas, ketus, stiklas, marmuras) vadinamos **trapiomis.** Trapios medžiagos labai jautrios smūginėms apkrovoms — nuo staigiai didėjančių apkrovų jos lengvai suyra.

Tačiau trapios medžiagos dažniausiai būna labai **kietos,** o ši savybė būtina kai kurių mechanizmų detalėms, įrankiams. Medžiagų kietumas nustatomas įspaudžiant vienoda jėga į jų paviršių deimantinę piramidę ir matuojant pėdsako gylį. Metalams sukietinti į juos įterpiama specialių priedų, gaminių paviršius grūdinamas.

? *1. Kuo skiriasi tempimo ir gniuždymo santykinė deformacija?*
2. Kokia deformacija veikia strypą, ant kurio tvirtinami durų lankstai?
3. Kokioms deformacijoms atlikti skirti priekiniai ir krūminiai dantys?

■ **17.3.** Kokia mažiausia apkrova turi veikti 4,0 m ilgio ir 2,0 mm^2 skerspjūvio ploto žalvarinę vielą, kad atsirastų liktinė deformacija? Koks tada bus vielos santykinis pailgėjimas? Žalvario tamprumo riba $\sigma_t = 1{,}1 \cdot 10^8$ Pa. Vielos masės nepaisoma.

■ **17.4.** Koks yra 2,0 m ilgio ir 10,0 mm^2 skerspjūvio ploto plieninio strypo absoliutinis pailgėjimas, jeigu jo potencinė energija $4{,}4 \cdot 10^{-2}$ J?

18 paskaita

ŠILUMINIS PLĖTIMASIS — DRAUGAS IR PRIEŠAS

„Statant ką iš įvairių daiktų, metalams (naugėms) reikia palikti daugiaus ruimo, kad orui atsimainius, turėtų kur skėstis. Dėlto tai visados ant geležinkelio tarp plienvėžių galų esti paliekami plyšiai, nes plienvėžėms nuo šilumos prasiskėtus, jos, susirėmę savo galais, išsilenktų, per tai trukis galėtų nuo jų nuvirsti".

Iš pirmojo lietuviško fizikos vadovėlio

§ 18.1. Kūnų šiluminio plėtimosi reikšmė gamtoje ir technikoje

Kad nuo šilumos kūnai plečiasi, o nuo šalčio traukiasi, jau seniai žinome iš savo patirties ir gamtos pažinimo pamokų. Šis reiškinys nepaprastai svarbus ir gamtoje, ir technikoje. Štai keletas pavyzdžių.

Šiluminis plėtimasis ardo uolienas, sukelia vandenynų ir jūrų sroves, vėjus, padeda susidaryti debesims, daro įtaką daugeliui kitų procesų.

Šiluminis plėtimasis deformuoja vamzdynus, geležinkelio bėgius, konstrukcijas, mašinų ir įrenginių dalis, iškraipo matavimo prietaisų parodymus. Jis — tikslumo priešas. Todėl gamyklų cechuose, kur surenkamos labai tikslaus metalo apdirbimo staklės, temperatūra gali svyruoti vos vienu laipsniu — kitaip neįmanoma pasiekti reikiamo detalių tikslumo. Oro kondicionavimo įtaisai juose automatiškai palaiko 20 ± 1 °C temperatūrą ir 55—65 % drėgmę. Dar stabilesnėje temperatūroje gaminami mikroelektronikos įtaisai, laikomi itin tikslūs matavimo prietaisai ir matų etalonai.

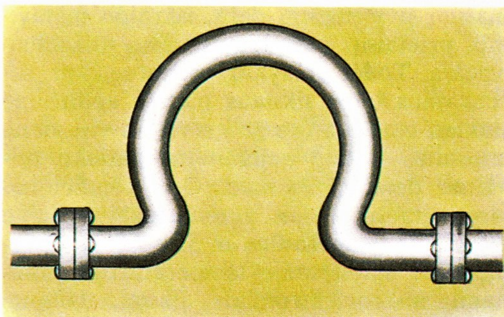
Kur dėti vamzdžio perteklių?

Paleidus vamzdžiais karštą vandenį, 10 km ilgio termofikacijos magistralė gali pailgėti apie 10 m! Dideli įtempimai, atsirandantys dėl šiluminio plėtimosi arba traukimosi, gali išvesti iš rikiuotės svarbias konstrukcijas, jeigu iš anksto nebus imtasi atsargumo priemonių. Dėl to paliekami tarpeliai tarp betono plokščių, daromi *kompensatoriai* garo ir karšto vandens vamzdžiuose (18.1 pav.), dedamos ant ritinių tiltų santvaros (18.2 pav.) ir kt. Kad būtų tvirti sujungimai, stengiamasi sujungiamas detales daryti iš maždaug vienodai besiplečiančių medžiagų.

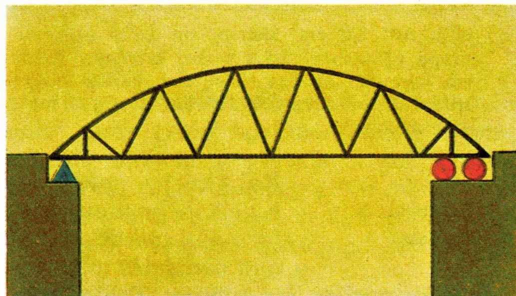
Metalinis termometras

Šiluminis plėtimasis gana plačiai pritaikomas technikoje, ypač matavimo ir automatikos prietaisuose. Juo pasinaudojus daromi termometrai ir termoreguliatoriai, automatiškai palaikantys nustatytą temperatūrą patalpoje, šaldytuve, inkubatoriuje, lygintuve ir kt.

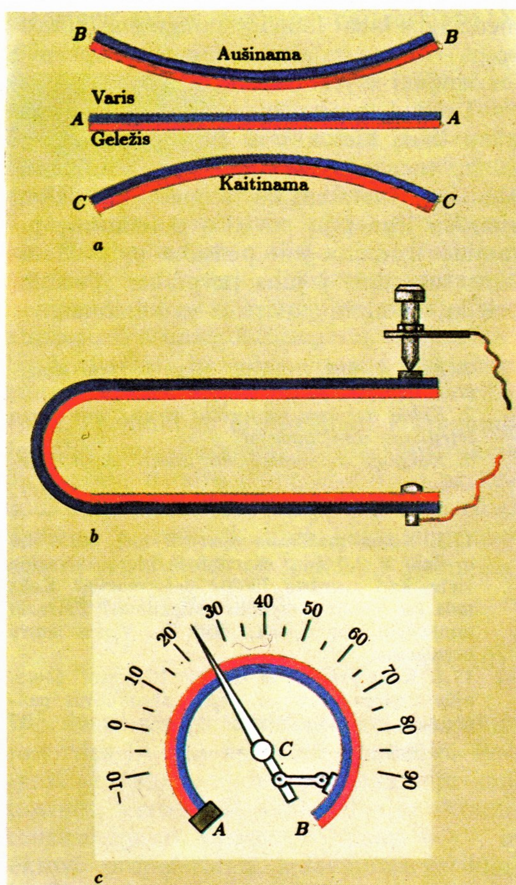
Pagrindinė įvairių termoreguliatorių detalė yra **bimetalinė plokštelė**, sukniedyta iš dviejų skirtingai besiplečiančių metalų (18.3 pav., *a*). Kintant temperatūrai ji riečiasi į vieną arba į kitą pusę. Ji gali



18.1 pav.



18.2 pav.



18.3 pav.

įjungti ir atjungti elektros grandinę (18.3 pav., *b*) (pavyzdžiui, šildytuve), gali įjungti gaisro signalizatorių, neleistinai pakilus temperatūrai, gali veikti įvairiausiuose kitokiuose automatikos prietaisuose. Pritvirtinus rodyklę ir sugradavus temperatūros laipsniais, gaunamas metalinis termometras (18.3 pav., *c*), ypač plačiai naudojamas aukštos temperatūros įrenginiuose.

§ 18.2. Linijinis šiluminis plėtimasis

Keičiantis temperatūrai, kinta visi kūno matmenys, bet daugeliu atvejų svarbu žinoti plėtimąsi tik viena kryptimi, t. y. **linijinį plėtimąsi.** Jį būtina iš anksto apskaičiuoti, pavyzdžiui, tiesiant geležinkelį, garotiekį, elektros tiekimo linijas ir kt.

Stebinantis sutapimas?

Eksperimentais nustatyta, kad linijiniam šiluminiam kūnų plėtimuisi galioja visai panaši į Huko dėsnį taisyklė: *santykinis pailgėjimas yra proporcingas temperatūros pokyčiui, t. y.*

$$\varepsilon = \alpha \Delta t. \qquad (18.1)$$

Proporcingumo koeficientas α šioje formulėje vadinamas **ilgėjimo koeficientu.** Jis priklauso nuo medžiagos savybių.

Iš (18.1) formulės

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta l},$$

taigi *ilgėjimo koeficientas yra santykinio pailgėjimo ir temperatūros pokyčio santykis.* Jis rodo, kiek pasikeičia kūno santykinis pailgėjimas, temperatūrai pakitus vienu laipsniu. α matuojamas $°C^{-1}$, arba K^{-1}. Įvairių medžiagų ilgėjimo koeficientai surašyti X lentelėje.

(18.1) formulėje $\varepsilon = \dfrac{\Delta l}{l_0}$, o $\Delta t = t - t_0$; jeigu pradinė temperatūra $t_0 = 0$, tai absoliutinis pailgėjimas

$$\Delta l = \alpha l_0 t. \qquad (18.2)$$

Pavyzdys. Kokios masės svarstį reikėtų pakabinti ant 1 cm^2 skerspjūvio ploto varinės vielos, kad ji pailgėtų lygiai tiek, kiek pašildyta vienu laipsniu?

S p r e n d i m a s. Sąlygoje reikalaujama, kad šiluminė ir mechaninė santykinės deformacijos būtų lygios:

$$\varepsilon_{š} = \varepsilon_m.$$

Žinome, kad

$\varepsilon_{š} = \alpha t$, o $\varepsilon_m = \frac{F}{ES}$, taigi

$\frac{F}{ES} = \alpha t$. Iš čia

$$F = ES\alpha t. \qquad (18.3)$$

Išrašome iš sąlygos ir lentelių reikiamus duomenis:

$E = 1{,}2 \cdot 10^{11}$ Pa,

$S = 1\ cm^2 = 10^{-4}\ m^2$,

$\alpha = 17 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$,

$t = 1\ °C$.

Įrašome į (18.3) lygybę:

$F = 1{,}2 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-4} \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \quad N = 204$ N.

$$m = \frac{F}{g} = \frac{204}{9{,}8}\ kg = 20{,}8\ kg.$$

Ats. $m = 20{,}8$ kg.

Praktikoje dažniausiai tenka skaičiuoti kūno ilgį l pakitus temperatūrai. Į (18.2) formulę įrašome $\Delta l = l - l_0$:

$$l - l_0 = \alpha l_0 t;$$
$$l = l_0 + \alpha l_0 t;$$
$$l = l_0\ (1 + \alpha t). \qquad (18.4)$$

Kai temperatūros pokytis neigiamas, antrasis narys skliaustuose taip pat neigiamas — aušinamas kūnas trumpėja.



Simas Klaidelė pasiūlė atšaldyti vinį iki temperatūros $t = -\frac{1}{\alpha}$ ir stebėti, kaip ji susitrauks iki nulio! (Įrašius (18.4) formulėje $t = -\frac{1}{\alpha}$, tikrai gauname $l = 0$). Kodėl toks eksperimentas neįmanomas?

§ 18.3. Ploto ir tūrio kitimas kūnui šylant

Nagrinėjant plokščių kūnų (pavyzdžiui, skardos lakšto) plėtimąsi, dažnai būna svarbu apskaičiuoti jų ploto pokytį. Nesunku įrodyti matematiškai, kad, kai α yra mažas dydis, ploto pokytis

$$\Delta S = 2\alpha S_0 t \qquad (18.5)$$

ir

$$S = S_0\,(1 + 2\alpha t); \qquad (18.6)$$

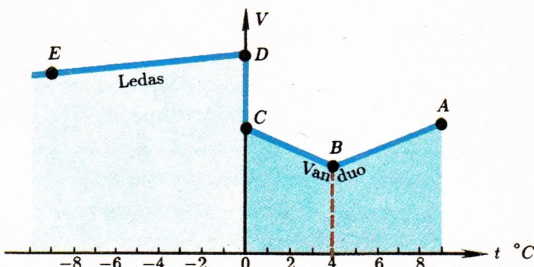
čia S_0 — paviršiaus plotas 0 °C temperatūroje. Vadinasi, analogiškas ploto didėjimą apibūdinantis koeficientas yra lygus 2α.

Svarbu įsidėmėti, kad kūnai plečiasi tik į išorės pusę, jų viduje esančios skylės arba ertmės pašildžius didėja. Kalbant apie kūnų tūrinį plėtimąsi, dažnai įvedamas analogiškas **tūrinio plėtimosi koeficientas** β. Tada tūris bet kokioje temperatūroje skaičiuojamas pagal analogišką (18.4) formulę

$$V = V_0(1 + \beta t). \qquad (18.7)$$

Skysčių tūrinio plėtimosi koeficientai nurodomi lentelėse (XI lent.). Daugumos kietųjų kūnų šis koeficientas $\beta = 3\alpha$. Taigi kietiesiems kūnams (18.7) formulę galima perrašyti šitaip:

$$V = V_0(1 + 3\alpha t). \qquad (18.8)$$



18.4 pav.

Kodėl tvenkinys neįšąla iki dugno?

Įdomi ir labai svarbi gamtoje yra vandens šiluminio plėtimosi anomalija. Vanduo aušdamas traukiasi tik iki +4 °C (18.4 pav., *AB*). Toliau krintant temperatūrai vanduo pradeda vėl plėstis (grafiko dalis *BC*). Sušaldomas į ledą vanduo smarkiai ir su didele jėga išsiplečia (atkarpa *CD*).

Taigi +4 °C temperatūros vanduo yra pats sunkiausias ir skęsta į dugną. Dėl to vanduo užšąla tik nuo paviršiaus, o gilumoje net per speigus lieka +4 °C temperatūra. Tai gelbsti nuo žūties vandens augmeniją ir gyvūniją.

§ 18.4. Kaip priklauso nuo temperatūros medžiagos tankis

Naudodamiesi medžiagų tankio lentelėmis (I lent.), gal būt, atkreipėte dėmesį į pastabą, kad kietųjų kūnų ir skysčių tankis jose nurodomas 20 °C temperatūroje, o dujų — 0 °C temperatūroje. Ką gi daryti, kai kūnų temperatūra kitokia?

Išvesime formulę medžiagos tankiui bet kokioje temperatūroje apskaičiuoti. Naudosimės žinoma tankio formule $\varrho = m/V$ ir atsižvelgsime į tai, kaip tūris V priklauso nuo temperatūros: $V = V_0(1 + \beta t)$. Taigi

$$\varrho = \frac{m}{V_0(1 + \beta t)}.$$

Tačiau $m/V_0 = \varrho_0$ — tankis pradinėje (0 °C) temperatūroje. Pertvarkę gauname:

$$\varrho = \frac{\varrho_0}{1 + \beta t}.$$

Kaip ϱ_0 galime imti (su nežymia paklaida) tankio vertes, pateiktas lentelėse.

18.1. Apskaičiuokite geležies tankį 200 °C ir −70 °C temperatūroje.



18.5 pav.

? *1. Kodėl, pakaitinus butelio kakliuką, lengvai išsiima įstrigęs stiklinis kamštis?*
2. Sugalvokite ir nubraižykite gaisro signalizatoriaus principinę schemą.
3. Nubraižykite analogišką 18.4 paveikslui vandens tankio kitimo tame pačiame temperatūros intervale grafiką.
4. 18.5 paveiksle parodytas plakatas, įspėjantis, kad benzino negalima pilti daugiau negu užrašyta. Kodėl?

18.2. 6,00 m ilgio geležinė viela, leidžiant elektros srovę, įkaito iki raudonumo ir pailgėjo 37,0 mm. Keliais laipsniais pakilo jos temperatūra?

18.3. Kiek pailgės 80 cm^2 skerspjūvio ploto ketaus trinkelė, jai įkaitinti suvartojus $1{,}63 \cdot 10^8$ J šilumos?

Pakartokite § 8.4.

19 paskaita

KAI PAKRINKA ATOMŲ RIKIUOTĖ

„Dėl sutirpdinimo kietųjų daiktų reikia pasigauti kai-kurio pragumo, kursai tarsi tarp savęs surištas kietojo daikto molekulas išliuosuotų, išrištų. Reikia, taip sakant, sutraukyti nematomą surišimą tų dalelių. Tą atlieka šiluma“.

Iš pirmojo lietuviško fizikos vadovėlio

§ 19.1. Kristalinių kūnų lydymasis ir kietėjimas

Prisiminkime

Pirmąsias sistemingas žinias apie medžiagų perėjimą iš vienos agregatinės būsenos į kitą gavome pradiniame fizikos kurse. Žinome, kad *medžiagos perėjimas iš skystosios būsenos į kietąją vadinamas* **kietėjimu,** arba **kristalizacija,** o atvirkščias perėjimas — **skystėjimu, lydymusi**; medžiagos kietėja toje pačioje temperatūroje, kurioje lydosi, o visą kietėjimo arba lydymosi laiką kūno temperatūra nekinta.

Šilumos kiekis, reikalingas 1 kg medžiagos paversti skysčiu lydymosi temperatūroje, vadinamas **specifine lydymosi šiluma.** Ji matuojama J/kg ir žymima raide λ. Kai kurių medžiagų specifinės lydymosi šilumos pateiktos XII lentelėje.

Šilumos kiekis, reikalingas visam masės m kūnui išlydyti,

$$Q = m\lambda \qquad (19.1)$$

— tai to kūno **lydymosi šiluma.**

Prisiminkime, kaip lydymasis bei kietėjimas buvo aiškinamas remiantis molekuline kinetine medžiagų sandaros teorija. Kūnui šylant atomų arba molekulių svyravimai tiek padidėja, kad kristalinė gardelė pradeda irti. Tuo metu visa gaunama energija eikvojama molekulių sankabos jėgoms nugalėti, todėl medžiagos temperatūra nekyla.

Medžiagai kietėjant viskas vyksta atvirkščiai — molekulių energija ir greitis tiek sumažėja, kad traukos jėgos vėl jas suartina ir išlaiko gardelės „rikiuotėje“. Kietėdamas kūnas išskiria tiek pat šilumos, kiek suvartojama jam suskystinti.

Ketus ketuje plaukia, geležis geležyje skęsta

Dabar pakalbėsime apie dar kitas šių virsmų ypatybes: kaip kinta kietėjant ir lydantis

medžiagos tūris, kokios turi įtakos lydymosi temperatūrai išorinis slėgis?

Daugumos medžiagų tūris lydantis didėja, nes kristalinėje gardelėje dalelės būna išsidėsčiusios tankiau negu skystyje. Tačiau yra nemažai ir tokių medžiagų, kurios skystos yra didesnio tankio negu kristalinės. Tokios medžiagos (pavyzdžiui, ledas, ketus, silicis, bismutas) kietėdamos plečiasi (18.4 pav., *CD*).

Suprantama, kad tos medžiagos, kurios kietėdamos plečiasi, t. y. besilydydamos traukiasi, padidinus slėgį lydosi žemesnėje temperatūroje: slėgis padeda jų molekulėms sutankėti. Ir priešingai, kai medžiaga lydymosi metu plečiasi, išorinis slėgis stabdo jos lydymąsi, taigi reikalinga aukštesnė lydymosi temperatūra.

Medžiagos lydymosi temperatūra, esant normaliajam atmosferos slėgiui, vadinama **lydymosi tašku**. Kai kurių medžiagų lydymosi taškai surašyti XII lentelėje.

Technikoje labai reikalingos medžiagos, besilydančios itin aukštoje temperatūroje. Iš jų paminėtini gryni elementai: volframas, besilydantis 3387 °C, grafitas — 3800 °C, tantalas — 2996 °C temperatūroje. Jos naudojamos kaitinimo elementams (pavyzdžiui, elektros lempučių spiralėms), šiluminių mašinų ir kitų aukštos temperatūros įrenginių (atominių reaktorių, raketų) detalėms gaminti. Kita svarbi atsparių kaitrai medžiagų grupė yra specialios keraminės medžiagos.

Įvairios priemaišos žymiai sumažina metalų lydymosi temperatūrą. Pavyzdžiui, grynas alavas lydosi 232 °C temperatūroje, grynas švinas — 327 °C, o sulydžius dvi dalis alavo ir vieną dalį švino gaunamas plačiai naudojamas lydmetalis, kurio lydymosi taškas tik 170 °C.

§ 19.2. Šilumos balansas medžiagoms lydantis ir kietėjant

Kai, vykstant šilumos apykaitai, ne tik kinta kūnų temperatūra, bet ir jie lydosi ar kietėja, šilumos balanso lygtį (8.1) reikia papildyti skystėjimo šilumos kiekiu $Q = \lambda m$. Uždavinių sprendimo taisyklės lieka tos pačios, kaip § 8.4. Svarbiausia — atidžiai išsiaiškinti visus iki vieno balansą sudarančius šilumos kiekius. Šiam tikslui labai praverčia medžiagos agregatinės būsenos kitimo grafikas (19.2 pav.).

Pavyzdys. 1,2 kg masės stikliniame inde esantį vandenį, kurio tūris 30 l ir temperatūra 80 °C, reikia atšaldyti iki 5 °C 0 °C temperatūros ledo gabaliukais. Kiek ledo reikės įmesti?

S p r e n d i m a s. Nupiešiame piešinį (19.1 pav.) ir nubraižome šilumos balanso grafiką (19.2 pav.).

1. Kaip matome 19.2 paveiksle, balansą sudaro 4 šilumos kiekiai:

šilumos kiekis, kurį *atidavė* karštas vanduo ataušdamas nuo 80 iki 5 °C, $Q_1 = m_1 c_1 \Delta t_1$;

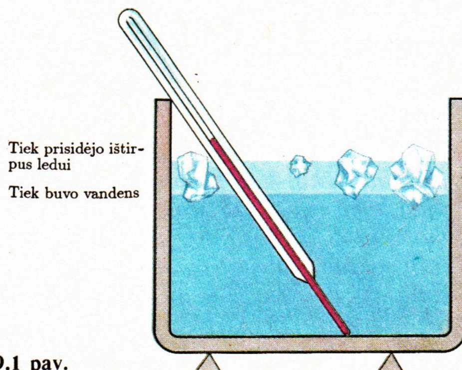
šilumos kiekis, kurį *atidavė* indas, ataušdamas nuo 80 iki 5 °C, $Q_2 = m_2 c_2 \Delta t_2$;

šilumos kiekis, kurį *gavo* tirpdamas ledas, $Q_3 = m_3 \lambda$;

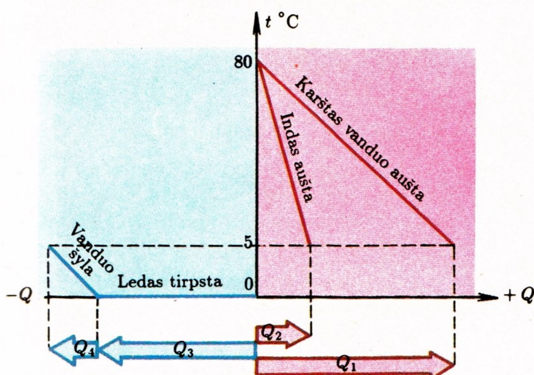
šilumos kiekis, kurį *gavo* iš ledo atsiradęs vanduo, sušildamas nuo 0 iki 5 °C, $Q_4 = m_3 c_1 \Delta t_4$.

2. Sudarome šilumos balanso lygtį:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4.$$



19.1 pav.



19.2 pav.

3. Įrašome šilumos kiekių išraiškas:

$$m_1c_1\Delta t_1 + m_2c_2\Delta t_2 = m_3\lambda + m_3c_1\Delta t_4.$$

4. Išreiškiame ieškomąjį dydį — ledo masę:

$$m_3 = \frac{m_1c_1\Delta t_1 + m_2c_2\Delta t_2}{\lambda + c_1\Delta t_1}.$$

5. Išrašome iš sąlygos ir lentelių reikiamus duomenis:

$m_1 = 3$ kg,

$c_1 = 4,2\cdot10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$,

$\Delta t_1 = 80\ °\text{C} - 5\ °\text{C} = 75\ °\text{C}$,

$m_2 = 1,2$ kg,

$c_2 = 8,4\cdot10^2 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$,

$\Delta t_2 = \Delta t_1 = 75\ °\text{C}$,

$\lambda = 3,35\cdot10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$,

$\Delta t_4 = 5\ °\text{C}$.

6. Įrašome duomenis į ieškomojo dydžio išraišką ir apskaičiuojame:

$$m_3 = \frac{3\cdot4,2\cdot10^3\cdot75 + 1,2\cdot8,4\cdot10^2\cdot75}{3,35\cdot10^5 + 4,2\cdot10^3\cdot5}\ \text{kg} = 2,87\ \text{kg}.$$

Ats. $m_3 = 2,87$ kg.

? *1. Kodėl ežerų apsuptame Trakų mieste rudenį ežerams užšąlant būna 3—5 laipsniais šilčiau negu netoliese esančiame Lentvaryje, o pavasarį ledui tirpstant — šalčiau?*
2. Kodėl nėra medžiagų kietėjimo taškų lentelės?
3. Ar šerkšnas pagreitina augalų atšalimą, ar jį sulėtina?
4. Kodėl meno dirbiniams lieti tinka tik tokios medžiagos, kurios kietėdamos plečiasi?

▲ **19.1.** Nubraižykite namų darbo uždaviniams šilumos balanso grafikus.

■ **19.2.** 100 g masės geležiniame inde yra 500 g vandens ir 200 g ledo, kurių temperatūra 0 °C. Kiek reikia įpilti 100 °C temperatūros vandens, kad bendra temperatūra pakiltų iki 32,0 °C?

■ **19.3.** Sniegui nutirpdyti 200 m² plote buvo panaudotas tirpdytuvas, kurio n. k. 45 %. Kiek malkų teko jame sudeginti, jeigu sniego tankis buvo 200 kg/m³, dangos storis 25 cm, oro temperatūra — 1 °C, o iš tirpdytuvo ištekančio vandens temperatūra 2 °C?

2 dalis
ELEKTRA

1753 m. balandžio 3 d. Vilniaus universiteto profesorius Tomas Žebrauskas laiške Konstantinui Pliateriui rašė: „Elektros mašiną galime turėti paruoštą Garbingo Pono Geradario paslaugai“.

2.1 skyrius
ELEKTROSTATIKA

20 paskaita
SVARBIAUSIAS ELEKTROSTATIKOS DĖSNIS

§ 20.1. Elektroninė teorija

Mokslas apie elektros reiškinius sudaro žymią šiuolaikinės fizikos dalį. Šio *mokslo dalis, tirianti nejudančių elektros krūvių savybes ir sąveiką, vadinama* **elektrostatika.**

Nuo atominės prie elektroninės teorijos

Iki šiol nagrinėtus fizikinius reiškinius — dujų slėgį, skysčio garavimą, kristalo augimą ir kitus — aiškinome remdamiesi molekuline kinetine medžiagos sandaros teorija. Analogiškai elektriniai reiškiniai aiškinami remiantis **elektronine teorija.** Jos pagrindas yra šie eksperimentais patvirtinti teiginiai (§ 58.2):

1. *Egzistuoja dviejų rūšių elektros krūviai; jie vadinami teigiamais ir neigiamais.* Kiekvienas atomas sudarytas iš teigiamą elektros krūvį turinčio branduolio ir apie jį skriejančių neigiamą krūvį turinčių dalelių — elektronų. Branduolio krūvis yra lygus teigiamą krūvį turinčių dalelių — protonų — krūvių sumai. Elektronai išsidėstę apie branduolį sluoksniais ir sudaro atomo elektroninį apvalkalą (20.1 pav.).

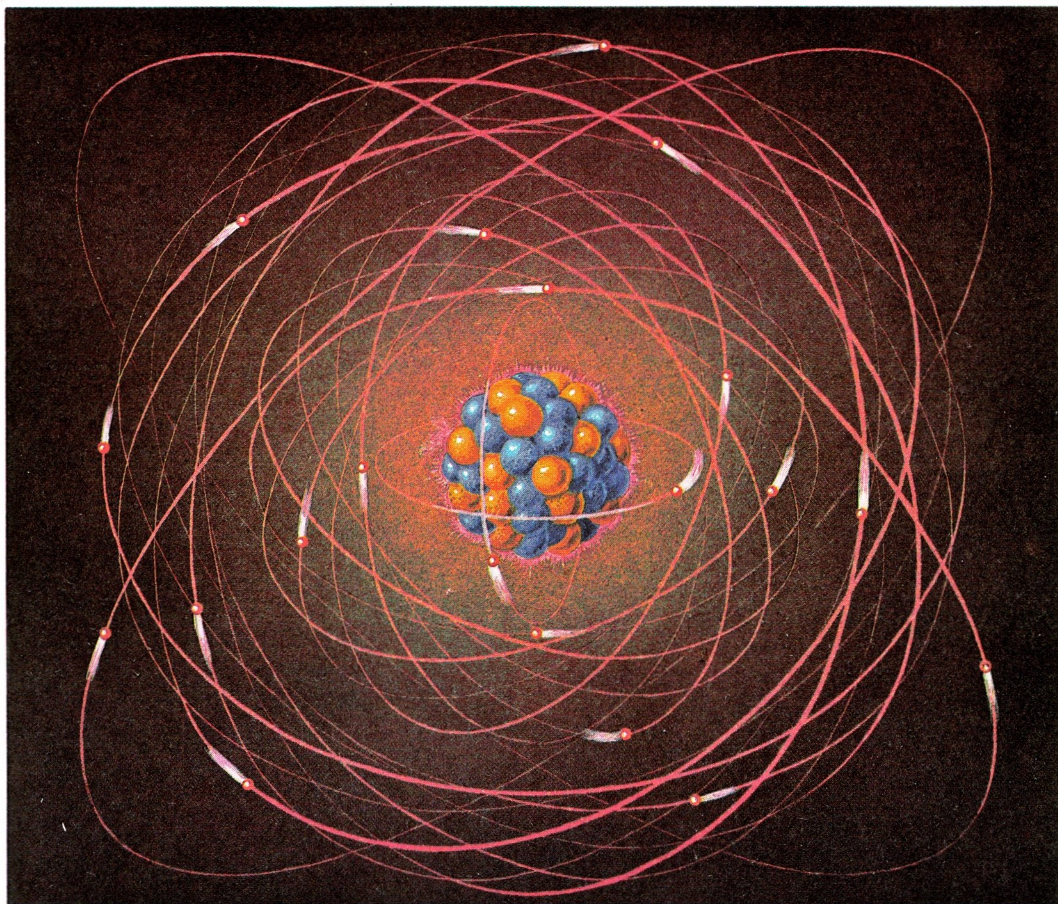
2. *Elektronų ir protonų krūviai yra vienodo absoliutinio didumo.* Jie **elementarūs**, t. y. nedalomi ir nuo nieko nepriklausomi. Kūno krūvį sudaro jame esančių dalelių elementariųjų krūvių algebrinė suma.

3. *Vienarūšiai krūviai vieni kitus stumia, įvairiarūšiai — traukia.* Atomo branduolys artimesnius elektronus traukia stipriau, tolimesnius — silpniau.

4. Kūnai yra *elektriškai neutralūs,* kai elektronų ir protonų skaičius juose vienodas. Tačiau atomų išoriniai elektronai, kuriuos branduoliai traukia silpniausiai, gali nuo jų atsiskirti ir likti laisvi arba prisijungti prie kitų atomų. Skirtingų medžiagų kūnams glaudžiai liečiantis, pavyzdžiui, trinantis jų paviršiams, *dalis elektronų gali pereiti iš vieno kūno į kitą ir sudaryti jame elektronų perteklių — neigiamą krūvį.* Tuomet kitame kūne *susidaro elektronų trūkumas, taigi atsiranda teigiamas krūvis.* Taip kūnai **įsielektrina.**

5. Elektros krūvis yra tvarus. Tai išreiškia **elektros krūvio tvermės dėsnis**: *izoliuotoje sistemoje elektros krūviai neišnyksta ir neatsiranda, jie gali tik kitaip pasiskirstyti sistemos kūnuose.*

Šie teiginiai iš esmės jau yra žinomi iš praeito fizikos ir chemijos kurso. Tačiau svarbu juos prisiminti, nes jais remiantis bus aiškinami nauji reiškiniai.



20.1 pav.

§ 20.2. Kulono dėsnis

Ankstesniame fizikos kurse su elektrostatikos reiškiniais susipažinome tik kokybiškai: dar nežinome, kokiais vienetais matuojami elektros krūviai, kaip apskaičiuojama jų sąveikos jėga. O tai labai svarbu.

Svarstyklės jėgai matuoti

Nejudančių krūvių sąveikos jėgas — elektrostatines jėgas — pirmasis ištyrė prancūzų mokslininkas Šarlis K u l o n a s (1736—1806). Jis buvo karo inžinierius, tvirtovių statybos specialistas ir tik laisvalaikiu atlikinėjo jį dominusius fizikos bandymus. Kulonas pats sukonstravo labai tikslų prietaisą, pasak išradėjo, „smulkiausiems jėgos laipsniams matuoti". Šis Kulono išrastasis prietaisas iki šiol vadinamas *sukamosiomis svarstyklėmis* (20.2 pav.).

Įelektrintas rutuliukas *A* pritvirtintas prie horizontalaus stiklinio strypelio, kuris

pakabintas ant plono metalinio siūlo. Priartinus įelektrintą rutuliuką *B*, strypelis pasisuka ir užsuka siūlą. Atskaičius skalėje strypelio posūkio kampą, iš jo sprendžiama apie krūvių sąveikos jėgos didumą.

Kulonas nustatė, kad, vieną iš dviejų krūvių padidinus *n* kartų, sąveikos jėga *padidėja taip pat n kartų*. Padidinus atstumą tarp krūvių *m* kartų, jų sąveikos jėga *sumažėja* m^2 *kartų*. Apibendrinęs bandymų rezultatus, Kulonas suformulavo dėsnį: *dviejų taškinių krūvių sąveikos jėga* (F) *tiesiog proporcinga tų krūvių* (q_1 *ir* q_2) *sandaugai ir atvirkščiai proporcinga atstumo* (r) *tarp jų kvadratui*:

$$F = K\frac{q_1 q_2}{r^2}. \qquad (20.1)$$

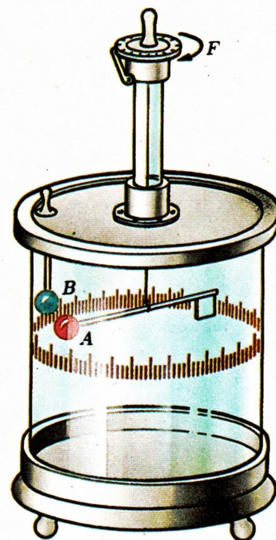
Gamtos mįslė ar atsitiktinumas?

Šį dėsnį vadiname **Kulono dėsniu***, o elektrostatinės sąveikos jėgą — Kulono jėga. Ji veikia išilgai tiesės, einančios per krūvių centrus. Kulono dėsnis stebėtinai panašus į Niutono visuotinės traukos dėsnį

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}, \qquad (20.2)$$

tik elektrostatinės jėgos yra nepalyginamai didesnės už gravitacines. Pavyzdžiui, dviejų elektronų tarpusavio stūmos jėga yra $4{,}2 \times 10^{42}$ kartų didesnė už jų gravitacinės traukos jėgą. Dar vienas įdomus pastebėjimas: anglų fizikas Polis Dirakas (gim. 1902 m.) apskaičiavo, kad šis jėgų santykis yra lygus visatos amžiui, išreikštam savotiškais vienetais temponais. Temponas — tai laikas, per kurį šviesa nueina atstumą, lygų elektrono spinduliui. Gal už šių sutapimų slypi dar neįminta gamtos mįslė?

* Tiksliau kalbant, šis dėsnis aprašo sąveiką tarp įelektrintų kūnų, kurių matmenys daug mažesni už atstumą tarp jų (taškinių krūvių sąveiką).



20.2 pav.

§ 20.3. Elektros krūvio vienetas

Nepademonstruojamas matavimo vienetas

Kulono dėsnio formulėje (20.1) esančių dydžių SI vienetai yra: sąveikos jėgos F — niutonas, atstumo r tarp įelektrintų kūnų centrų — metras, o elektros krūvių q — **kulonas** (žymimas C). Kulonas — tai elektros krūvis, lygus $6{,}26 \cdot 10^{18}$ elementariųjų (elektrono arba protono) krūvių e:

$$1\ \mathrm{C} = 6{,}25 \cdot 10^{18}\ e. \qquad (20.3)$$

Už eksperimentinį elektrono krūvio nustatymą

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C} \qquad (20.4)$$

JAV fizikas Robertas Milikenas (1868—1953) buvo apdovanotas Nobelio premija.

Proporcingumo koeficientas *K*, vartojant SI vienetus, lygus

$$K = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}. \qquad (20.5)$$

Taigi kuloną galima apibūdinti ir kaip tokį elektros krūvį, kuris kitą esantį 1 m atstumu tokio pat didumo krūvį veiktų $9 \cdot 10^9$ N jėga! Tokia milžiniška jėga bemat išplėštų elektronus iš medžiagos. Tarp tokių krūvių trenktų žaibas, jeigu jie būtų ne tik 1 m, bet netgi 3 km atstumu vienas nuo kito.

Atrodo keista, tačiau, šviečiant kišeninio žibintuvėlio lemputei, jos siūleliu kulono krūvis prateka kas 4 sekundės. Priversti judėti laidais elektros krūvius, pasirodo, kur kas paprasčiau negu juos kaupti.

§ 20.4. Aplinkos įtaka krūvių sąveikai

Toliau tyrinėjant Kulono jėgas, paaiškėjo, kad (20.1) formulė teisinga tik tuo atveju, kai elektros krūviai yra vakuume arba ore. (Oras sąveikos jėgą jau šiek tiek pakeičia — susilpnina 0,06 %.) Įterpus tarp krūvių įvairias medžiagas (pavyzdžiui, gumą, stiklą, žėrutį, gintarą) arba panardinus juos į nelaidžius skysčius (žibalą, alyvą, gliceriną), Kulono jėga sumažėja keleriopai.

Esančios tarp krūvių medžiagos įtakai krūvių sąveikai įvertinti įvedama **dielektrinės skvarbos** sąvoka. *Medžiagos dielektrinė skvarba — tai skaičius, rodantis, kiek kartų krūvių sąveikos jėga toje medžiagoje yra mažesnė negu vakuume.* Ją žymime raide ε (epsilon).

Dažniausiai naudojamų dielektrikų skvarbos pateiktos XIII lentelėje.

Kulono dėsnio formulę apibendrindami krūvių sąveikai bet kokioje aplinkoje, turime joje įrašyti aplinkos dielektrinę skvarbą ε:

$$F = K\frac{q_1 q_2}{r^2\varepsilon}. \qquad (20.6)$$

Simas Klaidelė sugalvojo elektrostatinį amžinąjį variklį: elektros krūviai ore vienas kitą traukia 80 kartų stipriau negu vandenyje. Vadinasi, 20.3 paveiksle atvaizduoti ratai turi suktis kryptimis, kurias rodo rodyklės.
Kodėl jo projektas nebuvo įgyvendintas?

Pavyzdys. Du vienodi laidūs rutuliukai, turintys $-1{,}5 \cdot 10^{-5}$ ir $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ C krūvius, pritraukė vienas kitą, susilietė ir vėl nutolo per 5,0 cm. Koks dabar kiekvieno rutuliuko krūvis ir kokia jėga jie sąveikauja?

S p r e n d i m a s. Iliustruojame sąlygą piešiniu (20.4 pav., *a* ir *b*).

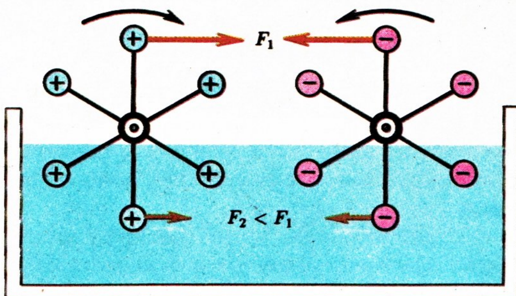
1. Rutuliukams susilietus jų krūvių algebrinė suma $-1{,}5 \cdot 10^{-5}$ C $+ 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ C $= 1 \cdot 10^{-5}$ C pasidalijo pusiau, nes abu rutuliukai vienodi. Taigi kiekvieno rutuliuko krūvis: $1 \cdot 10^{-5}$ C : 2 = $0{,}5 \times 10^{-5}$ C.

2. Sąveikos jėgą apskaičiuosime pagal Kulono dėsnio formulę

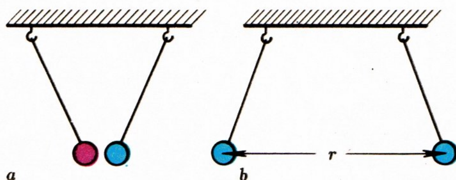
$$F = K\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2\varepsilon}.$$

3. Surašome reikiamus duomenis:

$$K = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2},$$



20.3 pav.



20.4 pav.

$q_1 = q_2 = 0{,}5 \cdot 10^{-5}$ C,

$r = 5$ cm $= 0{,}05$ m.

ε nenurodyta, todėl tarsime, kad krūviai sąveikauja vakuume, t. y.

$\varepsilon = 1$.

4. Įrašome duomenis ir apskaičiuojame:

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{(0{,}5 \cdot 10^{-5})^2}{0{,}05^2} \text{ N} = 90 \text{ N}.$$

Ats. $q_1 = q_2 = 0{,}5 \cdot 10^{-5}$ C; $F = 90$ N.

---

§ 20.5. Elektrostatiniai reiškiniai gamtoje, technikoje ir buityje

Mūsų gyvenime kasdien gausėja greitai įsielektrinančių medžiagų — plastmasių, sintetikos, stiklo, popieriaus. Gaminiai iš tokių medžiagų judėdami, besitrindami įsielektrina, ir tuo labiau, kuo greičiau juda. Įsielektrina perpilami skysčiai, tarp jų ir degalai, skrendantys lėktuvai, greitai važiuojantys automobiliai, įsielektrina ir todėl kibirkščiuoja vyniojamas į ritinius polietilenas, popierius, šilkas, įsielektrina sintetiniai ir vilnoniai rūbai. Statinis įsielektrinimas trikdo technologinius procesus, kibirkščiavimas net gali sukelti avarijas, o rūbuose ir aplinkoje susikaupę krūviai nepalankiai veikia žmogaus savijautą.

Nepageidautinas kūnų įsielektrinimas technologiniuose gamybos procesuose šalinamas: įžeminamos mašinų dalys, kurios gali įsielektrinti, drėkinamas oras, kad jis būtų laidesnis elektrai, audiniai mirkomi specialiame antistatiniame skystyje ir kt.

Elektrostatiniai reiškiniai gali būti ir naudingi. Metaliniai paviršiai nudažomi geriau ir ekonomiškiau, jeigu taikomas *elektrostatinis dažymas*. Dažomoji detalė įelektrinama teigiamai, o pulverizatorius — neigiamai; tada detalė pati pritraukia įsielektrinusius dažų lašelius.

Fabrikų dūmtraukiuose įrengiami *elektrostatiniai filtrai*. Kietos dūmų dalelės įelektrinamos ir prilimpa prie suodžių gaudytuvų.

1959 m. Vilniaus elektrografijos institute, vadovaujant J. Žilevičiui, buvo sukonstruoti pirmieji Sovietų Sąjungoje *elektrografiniai aparatai ERA*. Elektrografija — brėžinių, grafikų ir spausdinto teksto greito dauginimo metodas. Dauginamasis originalas fotografuojamas ant specialaus dielektriko sluoksnio. Susidaro neregimas atvaizdas, kuriame įprastą fotografijos patamsėjimą atstoja nevienodas statinis įsielektrinimas. Toks atvaizdas reljefiškai pritraukia specialius dažus, kuriuos perkėlus ant popieriaus ir gaunama originalo kopija.

▲ **20.1.** Nedideli vienodi metaliniai rutuliukai, turintys vienodo ženklo krūvius, buvo suglausti ir vėl atitolinti per 10 cm. Kokia jėga jie sąveikauja, jeigu prieš suglaudžiant rutuliukų krūviai buvo $70{,}0 \cdot 10^{-9}$ ir $30{,}0 \cdot 10^{-9}$ C? Kokie dabar jų krūviai?

?

1. Kas yra bendra tarp „elektrostatikos“ ir „statikos“ skyriaus mechanikoje?

2. Kodėl sulietus ar patrynus įsielektrina tik skirtingos medžiagos?

3. Kodėl patrintas į plaukus pripūstas balionėlis prilimpa prie lango stiklo?

4. Kokius žinote tvermės dėsnius?

5. Ištaisykite loginę klaidą teiginyje: „kūne trūksta elektronų todėl, kad jis yra teigiamai įelektrintas“.

■ **20.2.** Du krūviai, kurių vienas yra tris kartus didesnis už kitą, būdami vakuume 0,30 m atstumu sąveikauja 30 N jėga. Kokio didumo tie krūviai? Koks turėtų būti atstumas tarp jų vandenyje, kad sąveikos jėga liktų tokia pat?

■ **20.3.** Du maži vienodų spindulių ir masių rutuliukai kabo ore ant vienodo ilgio siūlų, pririštų viename taške. Atstumas nuo pakabos iki rutuliuko centro lygus 20,0 cm. Suteikus rutuliukams krūvius po $40{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, siūlai prasiskyrė 60° kampu. Apskaičiuokite rutuliukų mases.

21 paskaita

GEOMETRINIAI ELEKTRINIŲ LAUKŲ MODELIAI

§ 21.1. Elektrinis laukas

Nagrinėdami įelektrintų kūnų sąveikos jėgos dydį ir kryptį, nekalbėjome apie tai, kaip toji sąveika vyksta.

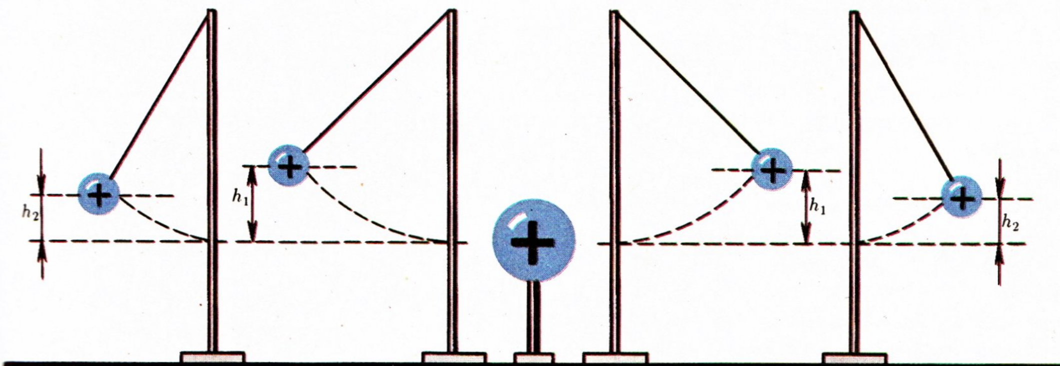
Krūviai veikia vienas kitą ir vakuume, vadinasi, medžiaga sąveikai perduoti nereikalinga. O vis dėlto nutolę vienas nuo kito krūviai veikia vienas kitą per tam tikrą aplinką, kuri perduoda tą sąveiką iš taško į tašką. Šį teiginį patvirtina tas faktas, kad nutolusių krūvių sąveika įvyksta ne akimirksniu: ji plinta kad ir labai dideliu, bet vis dėlto baigtiniu greičiu. Šis greitis, lygus $3 \cdot 10^8$ m/s, yra didžiausias gamtoje įmanomas greitis.

Elektrinio lauko savybės

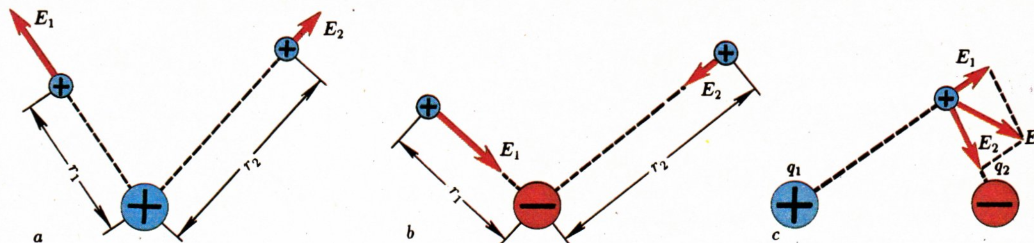
Elektros krūvių sąveiką perduodanti aplinka vadinama **elektriniu lauku.** Nejudančių elektros krūvių kuriamas laukas vadinamas **elektrostatiniu.** Elektrinis laukas tikrai egzistuoja — jis *materialus,* bandymais galima tirti jo savybes. Svarbiausia elektrinio lauko savybė — jis veikia tam tikra jėga elektros krūvius. Pagal šį veikimą nustatomas pats lauko buvimas, lauko pasiskirstymas erdvėje, palyginamas įvairių laukų intensyvumas.



Maiklas Faradėjus (1791—1867)



21.1 pav.



21.2 pav.

Kita vertus, elektrostatinis laukas susijęs su elektros krūviu — krūvis yra to lauko šaltinis. Laukas gali būti sukurtas ir vakuume, ir medžiagoje. Tolstant nuo krūvio elektrostatinis laukas silpnėja (21.1 pav.).

Elektrinio lauko sąvoką 1831 m. sukūrė anglų fizikas Maiklas F a r a d ė j u s.

Elektros krūvių sąveika ir ją perduodantys elektriniai laukai vaidina gamtoje nepaprastą vaidmenį. Tai ji sujungia branduolį ir elektronus į atomą, atomus — į molekules, pastarąsias — į kietas ir skystas medžiagas.

§ 21.2. Elektrinio lauko stiprumas

Kaip minėjome, apie elektrinį lauką bet kuriame taške galime spręsti iš to, kaip laukas veikia atsidūrusį tame taške elektros krūvį. Jeigu žinotume, kaip laukas veikia krūvį bet kuriame taške, tai galėtume sakyti, kad tas laukas yra visiškai ištirtas.

Kaip bandomąjį elektros krūvį laukui tirti sutarta naudoti *taškinį teigiamą krūvį*. Kuo bandomasis krūvis q_1 yra didesnis, tuo didesne jėga F jį veikia laukas (kitaip sakant, tą lauką kuriantis krūvis q). Santykis F/q_1 konkrečiame elektrinio lauko taške yra pastovus — jis priklauso tik nuo paties lauko. Šis santykis vadinamas **elektrinio lauko stiprumu** ir žymimas raide E:

$$E = \frac{F}{q_1}. \qquad (21.1)$$

Lauko stiprumo SI vienetas — niutonas kulonui (N/C). Lauko stiprumas E, kaip ir jėga F, yra *vektorinis* dydis. Lauko stiprumo bet kuriame taške vektoriaus kryptis sutampa su jėgos, veikiančios tame taške teigiamą krūvį, kryptimi. Todėl teigiamo krūvio kuriamo lauko stiprumo vektorius yra nukreiptas nuo lauko šaltinio, o neigiamo — link šaltinio (21.2 pav., *a, b*).

Kur laukas stipresnis?

(21.1) formulė sieja lauko stiprumą su jame esančiu ir lauko veikiamu krūviu q_1. Praktiškai svarbiau mokėti tirti lauką, žinant koks ir kur esantis taškinis elektros krūvis tą lauką *kuria.*

Sakykime, bandomasis krūvis q_1 yra nutolęs nuo lauką kuriančio krūvio q atstumu r. Jį veikiančią jėgą F galime išreikšti Kulono dėsnio formule (20.1). Įrašę tą išraišką į (21.1), gauname:

$$E = K\frac{qq_1}{r^2\varepsilon q_1},$$

$$E = K\frac{q}{r^2\varepsilon}. \qquad (21.2)$$

Vadinasi, lauko stiprumas proporcingas jį kuriančio taškinio elektros krūvio didumui ir atvirkščiai proporcingas atstumo iki to krūvio kvadratui.

Elektrinių laukų superpozicija

Tame pačiame erdvės taške gali būti dviejų ar daugiau krūvių kuriami elektros laukai.

Tuomet reikia žinoti, kaip gi jie veikia kartu. **Laukų sudėties,** arba **superpozicijos, principas** teigia: *atstojamojo lauko stiprumas yra lygus visų laukų stiprumų geometrinei sumai:*

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + ... + E_n. \qquad (21.3)$$

Paprasčiausiu atveju, kai sudedami du laukai, atstojamojo lauko stiprumas randamas pagal lygiagretainio taisyklę (21.2 pav., *c*).

Kauno Technologijos universitete sukurtas kompaktiškas elektroninis elektrostatinio lauko stiprumo ir krypties matuoklis. Matuoklis reikalingas meteorologijoje, tekstilės, popieriaus pramonėje ir kitur, kur reikia nustatyti aplinkos ar gaminių įsielektrinimą.

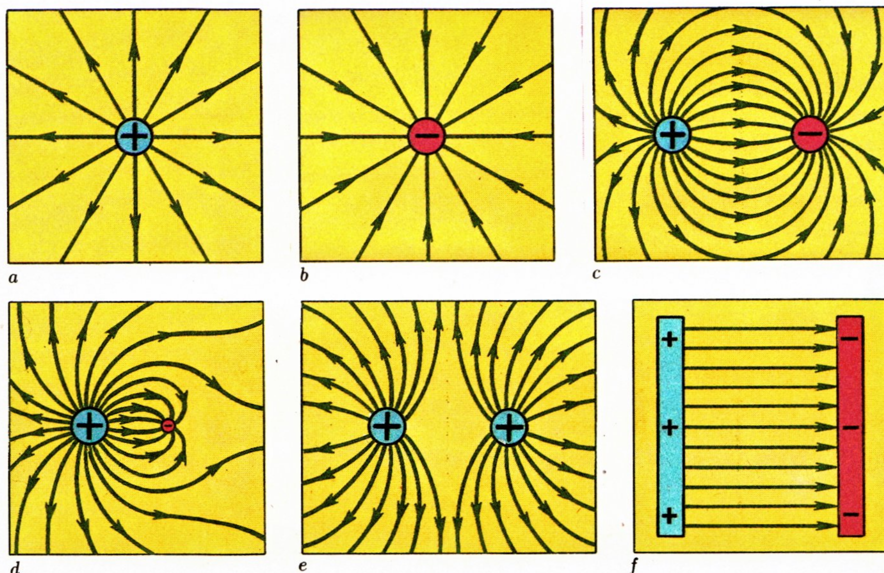
21.1. Elektrinio lauko taške $2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C krūvį veikia 0,015 N jėga. Koks yra tame taške lauko stiprumas?

21.2. Lauką glicerine kuria taškinis $7{,}0 \cdot 10^{-8}$ C krūvis. Apskaičiuokite jo stiprumą taške, nutolusiame nuo krūvio 7,0 cm.

§ 21.3. Elektrinių laukų grafinis vaizdavimas

Atskirame taške veikiantį elektrinį lauką galima vaizduoti stiprumo vektoriumi. Tačiau nustatinėti ir braižyti lauko stiprumo vektorius daugelyje taškų neracionalu. Todėl priimta elektrinius laukus grafiškai vaizduoti vadinamosiomis **lauko stiprumo linijomis,** arba **jėgų linijomis** (trumpiau — *lauko linijomis*). *Elektrinio lauko stiprumo linijomis vadiname tokias linijas, kurių liestinės kiekviename taške sutampa su lauko stiprumo vektoriaus kryptimi.* Linijų tankis proporcingas lauko stiprumui. Taigi elektrinį lauką lyg ir padengiame linijų, padedančių jame orientuotis, tinklu — tarsi žemėlapį lygiagretėmis.

21.3 paveiksle atvaizduotos įvairių elektrinių laukų linijos: *a* — teigiamo krūvio, *b* — neigiamo krūvio, *c* ir *d* — dviejų įvairiarūšių krūvių, *e* — dviejų vienarūšių krūvių ir *f* — lauko tarp dviejų lygiagrečių



21.3 pav.

plokštelių. Pastarasis laukas yra *vienalytis* — jo stiprumas visuose taškuose vienodas.

Elektrinių laukų „žemėlapių" savybės

Įvairiai išsidėstę krūviai sukuria elektrinius laukus, kurių stiprumo linijos gali sudaryti painiausią vaizdą. Tačiau visada galioja šios universalios lauko „žemėlapio" sudarymo taisyklės:

1. Per bet kurį elektrinio lauko tašką galima vesti tik vieną lauko liniją; kitaip tariant, elektrinio lauko linijos niekur nesikerta.

2. Elektrinio lauko linijos prasideda teigiamuose ir baigiasi neigiamuose krūviuose. Jos yra statmenos įelektrintų kūnų paviršiams.

Popieriniai elektrinių laukų modeliai

Elektrinio lauko linijos nėra kažkokios materialios linijos, tarsi įtempti siūlai, bet jos vaizdžiai rodo, kaip laukas pasiskirsto erdvėje. Jas galima padaryti ir „matomomis". Du metalinius rutuliukus ant izoliuojančių stovų reikia apklijuoti 10—12 cm ilgio plono popieriaus juostelėmis ir įelektrinti vienodo arba skirtingo ženklo krūviais. Popieriaus juostelės „atgis" ir tiksliai atkartos 21.3 paveiksle parodytus elektrinių laukų modelius. Darydami bandymą su dviem priešingais ženklais įelektrintomis plokštelėmis, galime stebėti ir vienalytį lauką.

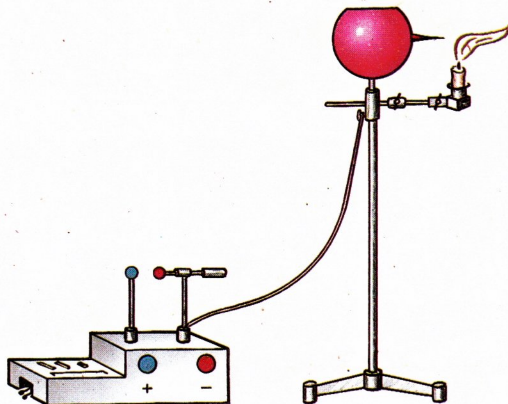
§ 21.4. Paviršinio krūvio tankis

Laidininkuose, pavyzdžiui, metaluose yra galinčių laisvai judėti ir turinčių krūvį dalelių — *krūvininkų*. Metalo atomams rikiuojantis į kristalinę gardelę, išoriniai elektronai atitrūksta nuo savo atomų ir pasklinda, tarsi dujos, tarpuose tarp gardelės mazgų. Laidininką įelektrinus, tarpusavio stūmos veikiami vienarūšiai krūviai stengiasi kuo labiau nutolti vienas nuo kito, todėl kūnui suteiktas krūvis susikaupia jo paviršiuje. Krūviai laidininke pasiskirsto taip, kad jo viduje elektrinio lauko stiprumas visur būtų lygus nuliui. Jeigu paviršius nėra visur vienodai kreivas (rutulys), tai elektros krūvis jame pasiskirsto netolygiai. Jo daugiausia susikaupia labiausiai nutolusiose paviršiaus vietose — kampuose, briaunose ir viršūnėse.

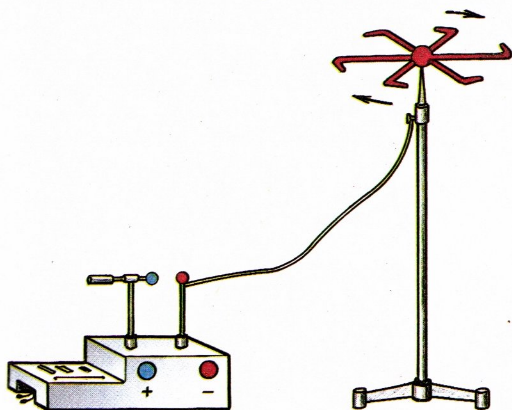
„Elektrinio slėgio" keistenybės

Susikaupę krūvininkai, panašiai kaip dujos, sudaro didelį „elektrostatinį slėgį". Panašiai kaip ylos smaigalyje nedidele jėga galima sudaryti milžinišką slėgį ir pradurti kietą kartoną, taip ir įelektrinto kūno smaigalyje gali susikaupti toks tankus krūvis, kad jis pradeda nutekėti. Susidaro tamsoje regimas švytintis „elektrinis vėjas", pučiantis žvakės liepsną (21.4 pav.), galintis sukti „elektrostatinį variklį" (21.5 pav.).

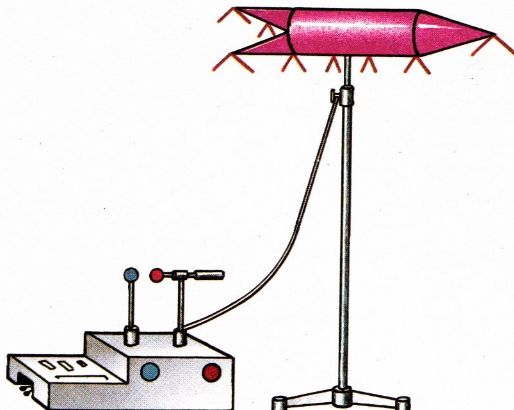
Tokiu atveju sakoma, kad susidarė didelis **paviršinio elektros krūvio tankis.** *Paviršinio krūvio tankiu* σ *vadinamas krūvio* q *ir paviršiaus ploto* S*, kuriame jis pasiskirstęs, santykis:*



21.4 pav.



21.5 pav.



21.6 pav.

$$\sigma = \frac{q}{S}. \qquad (21.4)$$

Paviršinio krūvio tankio SI vienetas yra C/m^2.

Kaip paviršinio krūvio tankis priklauso nuo įelektrinto kūno geometrinės formos, vaizdžiai parodo rodyklės formos laidininkas, įtvirtintas izoliaciniame stove ir apklijuotas popieriaus juostelėmis (21.6 pav.). Jį įelektrinus, lapeliai prasiskečia kampu, proporcingu σ.

▲ **21.3.** Trys lygūs vienodo ženklo krūviai q išdėstyti vienodais atstumais a vienas nuo kito. Koks yra lauko stiprumas jų sudaromo trikampio centre? Koks būtų ten lauko stiprumas, jeigu vienas krūvis būtų priešingo ženklo?

▲ **21.4.** Elektronas, patekęs į vienalytį elektrinį lauką vakuume, juda lauko stiprumo linijų kryptimi. Per kiek laiko jo greitis bus lygus nuliui, jeigu pradinis greitis lygus $1{,}8 \cdot 10^3$ km/s, o lauko stiprumas 90 N/C?

? *1. Kodėl 21.2 paveiksle, a ir b, nubraižyti lauko stiprumo vektoriai E_1 ir E_2 yra nevienodo ilgio?*
2. Kuris iš 21.2 paveiksle, c, pavaizduotų krūvių didesnis: q_1 ar q_2?
3. Kokiu atveju vektorių F ir E kryptys elektriniame lauke nesutampa?
4. Kuo skiriasi gravitacinio ir elektrinio lauko linijos?
5. Kodėl 21.3 paveiksle, d, elektrinio lauko linijos yra tokios neįprastos formos?

■ **21.5.** Kokia aplinka gaubia taškinį $4{,}5 \cdot 10^{-7}$ C elektros krūvį, jeigu 5,0 cm atstumu nuo jo lauko stiprumas lygus $2{,}0 \cdot 10^4$ N/C? Apskaičiuokite tos aplinkos absoliutinę dielektrinę skvarbą.

■ **21.6.** Du krūviai, $q_1 = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C ir $q_2 = 1{,}6 \cdot 10^{-7}$ C, yra 5,0 cm atstumu vienas nuo kito. Apskaičiuokite lauko stiprumą taške, nutolusiame nuo pirmojo krūvio 3,0 cm ir nuo antrojo 4,0 cm.

---

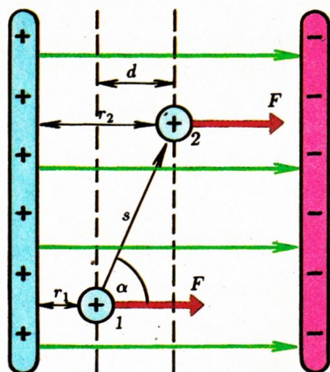
22 paskaita

AR GALI TUŠTUMA TURĖTI ENERGIJOS?

§ 22.1. Elektrinio lauko jėgų darbas perkeliant krūvį

Judant krūvį turinčiam kūnui elektriniame lauke, kaip ir judant kūnui Žemės traukos lauke, atliekamas darbas.

Išmokime apskaičiuoti darbą paprasčiausiu atveju, kai vienalyčiame stiprumo E



22.1 pav.

lauke krūvį q turintis kūnas (trumpiau sakysime: krūvis q) paslenka iš taško *1* į tašką *2* (22.1 pav.). Pasinaudokime žinoma iš mechanikos darbo formule

$$A = Fs \cos \alpha, \qquad (22.1)$$

tik jėgą F pakeiskime elektrostatine jėga. Išreikškime ją iš (21.1) formulės:

$$F = Eq.$$

22.1 paveiksle matome, kad $s \cos \alpha = d$. *Tik nuo šio nuotolio priklauso darbas elektriniame lauke* (kaip nuo h — gravitaciniame lauke)!

Taigi gauname:

$$A = Eqd. \qquad (22.2)$$

Elektrostatinių jėgų darbas $A = 0$, kai krūvis juda statmenai lauko linijoms ($\alpha = 90°$) arba apeina uždarą kontūrą — abiem atvejais $d = 0$. Šis darbas laikomas teigiamu, kai krūvį perkelia elektrinio lauko jėgos, ir neigiamu, kai jį perkelia išorinės jėgos, nugalėdamos lauko jėgas.

Elektrostatinių jėgų darbo išraiška (22.2), kaip matome, yra panaši į sunkio jėgos darbo formulę $A = mgh$. Šis panašumas nėra atsitiktinis: abu laukai, elektrinis ir gravitacinis, turi vienodą bendrą savybę: juose atliktas darbas nepriklauso nuo judėjimo trajektorijos formos. Iš tiesų, elektrinių jėgų darbas priklauso tik nuo pradinio ir galutinio taškų padėties — nuo poslinkio d, kaip ir sunkio jėgų darbas — tik nuo aukščių skirtumo h.

Potencialinis laukas

Laukas, kurio darbas nepriklauso nuo trajektorijos formos, vadinamas **potencialiniu.**

Elektrostatinis laukas, kaip ir gravitacinis, yra potencialinis.

Turintis krūvį kūnas elektriniame lauke (kaip ir turintis masę kūnas — gravitaciniame) lauko jėgų veikiamas gali judėti. Vadinasi, jis turi potencinės energijos. Kūnui judant toji energija kinta. Elektrinio lauko jėgų darbas perkeliant krūvį iš vieno taško į kitą yra krūvio potencinės energijos kitimo matas:

$$A_{12} = E_{p1} - E_{p2}. \qquad (22.3)$$

Krūviui judant statmenai jėgų linijoms arba uždaru kontūru darbas lygus nuliui. Tai būdinga kiekvienam potencialiniam laukui.

Lauko jėgų darbas mažina krūvio potencinę energiją (panašiai kaip kūnui krintant gravitaciniame lauke). Išorinių jėgų darbas didina krūvio potencinę energiją (panašiai kaip kūnui kylant aukštyn gravitaciniame lauke).

Su elektrinių jėgų darbu susiduriame visoje šių dienų technikoje. Veikiami elektrinio lauko juda krūviai laidininkuose — teka elektros srovė. Sudėtingi elektriniai laukai valdo sroves radioelektronikos prietaisuose. Stiprūs elektriniai laukai vakuume greitina elektronų pluoštą televizorių ekranuose, Rentgeno vamzdžiuose, elektrinėse lempose ir daug kur kitur.

§ 22.2. Elektrinio lauko įtampa ir potencialas

Darbas, t. y. krūvio potencinės energijos pokytis elektriniame lauke nepriklauso nuo trajektorijos formos — priklauso vien tik nuo kelio pradžios ir galo taškų. Vadinasi, elektros krūvio potencinė energija priklauso nuo paties krūvio didumo ir nuo lauko taško, kuriame jis yra, tam tikro „sugebėjimo teikti energiją".

Energinė elektrinio lauko charakteristika

Norėdami charakterizuoti šiuo požiūriu elektrinį lauką nepriklausomai nuo jame judančio elektros krūvio didumo, visus (22.3) lygties narius padalykime iš krūvio q:

$$\frac{A}{q}=\frac{E_{p1}}{q}-\frac{E_{p2}}{q}. \qquad (22.3a)$$

Kairėje lygties pusėje liko darbas pernešant vienetinį krūvį, o tai jau nepriklausantis nei nuo trajektorijos, nei nuo krūvio dydis — paties elektrinio lauko charakteristika. Ji vadinama **įtampa** tarp pradinio ir galinio taškų ir žymima raide U:

$$U=\frac{A}{q}. \qquad (22.4)$$

Dešinėje (22.3a) lygties pusėje esantys *potencinės energijos atitinkamuose taškuose ir krūvio didumo santykiai vadinami* **elektrinio lauko potencialais.** Potencialas žymimas raide φ:

$$\frac{E_{p1}}{q}=\varphi_1; \quad \frac{E_{p2}}{q}=\varphi_2.$$

Potencialas — skaliarinis dydis.

Į (22.3) formulę įrašę naujus dydžius, gausime:

$$U=\varphi_1-\varphi_2. \qquad (22.5)$$

Įtampa tarp dviejų elektrinio lauko taškų yra lygi tų taškų potencialų skirtumui.

Ką tai reiškia „220 voltų"?

Potencialo ir potencialų skirtumo SI vienetas, remiantis (22.4) formule, yra J/C. Pagerbiant italų fiziką Aleksandrą V o l t ą (1745—1827), šis vienetas pavadintas jo vardu. *Voltas (V) yra potencialų skirtumas tarp tokių dviejų taškų, tarp kurių perkeliant 1 C krūvį atliekamas 1 J darbas.*

Gyvas ungurio akumuliatorius

Volto pavadinimas gerai žinomas visiems, kas naudojasi elektra. Buitinė įtampa tarp laidų, kuriais mums tiekiama elektros energija, lygi 220 V, kišeninio žibintuvėlio lemputės gnybtų įtampa — 3,5 V. Dar mažesnės įtampos pakanka elektroninio laikrodžio ar mikrokalkuliatoriaus darbui. Kita vertus naudojamos technikoje ir labai aukštos įtampos. Pavyzdžiui, tolimo elektros perdavimo linijose sudaroma net 500 kV įtampa. Televizoriaus vamzdyje elektronus greitina 20 kV įtampa. Yra ir daug įvairių gyvų elektros „akumuliatorių". Pavyzdžiui, elektrinio ungurio, gyvenančio Brazilijos upėse, elektrostatinį smūgį sukelia 600 V įtampa. Kaip veikia žuvų elektros organai, galutinai neišaiškinta.

Elementariųjų dalelių energijos vienetas

Atominėje ir branduolinėje fizikoje tiksliems skaičiavimams plačiai vartojamas darbo ir energijos vienetas elektronvoltas (eV). Jeigu elektronas praskrieja elektriniame lauke tarp taškų, kurių potencialų skirtumas yra 1 V, tai lauko jėgos atlieka darbą $A=qU=eU=1{,}6\cdot10^{-19}\ \mathrm{C}\cdot1\ \mathrm{V}=1{,}6\cdot10^{-19}$ J. Šis darbas ir vadinamas elektronvoltu. Taigi

$$1\ \mathrm{eV}=1{,}6\cdot10^{-19}\ \mathrm{J}. \qquad (22.6)$$

Elektronvoltais, kaip ir džauliais, energija išreiškiama nepriklausomai nuo to, kokiu būdu dalelė tą energiją įgijo.

22.1. Elektroninis greitintuvas suteikia protonams $70{,}0 \cdot 10^9$ eV energiją. Išreikškite ją džauliais. Išreikškite elektronvoltais 1000 km/s greičiu judančio elektrono energiją.

Elektrinės „izotermės"

Elektrotechnikoje bene svarbiausias fizikinis dydis yra įtampa, kitaip sakant, lauko taškų potencialų skirtumas. Todėl elektrinių laukų „žemėlapiuose" patogiau yra orientuotis ne pagal lauko linijas, o pagal vienodo potencialo taškus jungiančias kreives — **ekvipotencialines linijas.** Panašiai orų žemėlapiuose mus labiausiai domina per vienodos temperatūros taškus einančios linijos — izotermės, nes iš jų kitimo matome, kaip atslenka iš pietų pavasaris, kaip artėja ir tolsta ciklonų frontai. Taip ir ekvipotencialinių linijų tinklas rodo, kaip sparčiai kinta tiriamo elektrinio lauko įtampa įvairiomis kryptimis. Ekvipotencialinės linijos braižomos taip, kad tarp dviejų gretimų linijų visur būtų ta pati įtampa, pavyzdžiui, 2, 5 ar 10 V.

Erdvėje apie krūvį arba kelis krūvius vienodo potencialo taškai sudaro **ekvipotencialinį paviršių.**

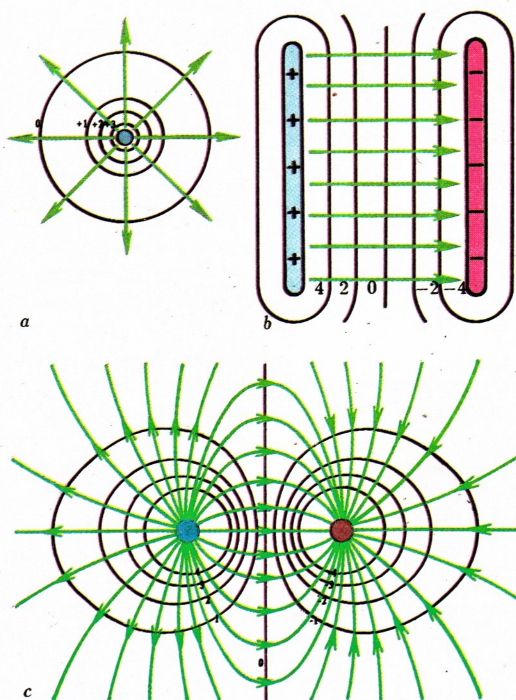
Ekvipotencialinės linijos ir ekvipotencialiniai paviršiai visuomet *statmeni lauko stiprumo linijoms,* nes tik taip judant krūviui neatliekama darbo, taigi nekinta potencialas. Todėl, žinant lauko linijų kryptį, nesunku nubraižyti ekvipotencialinius paviršius, ir atvirkščiai.

Taškinio krūvio ekvipotencialinės linijos — koncentriniai apskritimai (22.2 pav., *a*), vienalyčio lauko — tiesės (22.2 pav., *b*). Įvairiavardžių krūvių lauko ekvipotencialinės linijos pavaizduotos 22.2 paveiksle, *c*.

Atkreipkime dar kartą dėmesį į tai, kad, krūviui judant elektriniame lauke, atliktas darbas nepriklauso nuo kelio formos — priklauso tik nuo to, kuriame ekvipotencialiniame paviršiuje krūvis buvo ir į kurį perėjo. Jei įtampa tarp tų paviršių lygi U, darbas apskaičiuojamas pagal (22.4) formulę

$$A = qU.$$

Įelektrintame laidininke visų paviršiaus ir vidaus taškų potencialai būna vienodi, nes krūviai pasiskirsto taip, kad neliktų elektrinio lauko — *laidininko paviršius yra ekvipotencialinis paviršius.*



22.2 pav.

Kur baigiasi elektrinis laukas?

Kalbėdami apie aukštį h, visada turime omenyje, nuo ko jis matuojamas — žemės paviršiaus, grindų ar kitko: ten aukštį laikome lygiu nuliui. Panašiai reikia sutarti ir nulinio elektrinio potencialo vietą.

Vienalytis laukas tarp dviejų įelektrintų plokščių prasideda prie teigiamai įelektrintos ir baigiasi prie neigiamai įelektrintos plokštės. Taigi šiuo atveju nuliniu galime laikyti neigiamos plokštės potencialą. Kai lauką kuria pavienis krūvis, galime sakyti, kad nulinį potencialą turi be galo nutolę taškai. Tačiau elektrotechnikos praktikoje patogumo dėlei susitarta laikyti nuliniu *žemės potencialą*. Tokį pat nulinį potencialą turi ir visi laidininkai, gerai elektriškai sujungti su žeme (kaip sakoma, įžeminti).

Visais atvejais, kai krūvis juda lauke nuo taško, kurio potencialas φ_1, iki nulinio potencialo taško $\varphi_2 = 0$ (taip praktikoje dažniausiai ir būna), iš (22.5) lygybės turime:

$$U = \varphi_1 - 0 = \varphi_1.$$

Taigi, kalbėdami apie lauko *taško potencialą*, vis tiek turime omenyje *potencialų skirtumą*, nes reikia žinoti ir kito (nulinio potencialo) taško padėtį.

Kadangi $U = A/q$, tai ir taško potencialą galime išreikšti santykiu:

$$\varphi_1 = \frac{A}{q}. \qquad (22.7)$$

Įelektrinto rutulio potencialinis laukas

Sprendžiant uždavinius, dažnai tenka ieškoti potencialo nuotolyje r nuo *taškinio krūvio* q. Jau žinome elektrinio lauko stiprumo tokiame nuotolyje išraišką (21.2):

$$E = K\frac{q}{r^2\varepsilon}.$$ Taigi potencialas

$$\varphi = K\frac{q}{r\varepsilon}. \qquad (22.8)$$

Pagal šią formulę apskaičiuojamas ir *įelektrinto rutulio* lauko potencialas rutulio išorėje atstumu r nuo jo centro.

§ 22.3. Elektrinio lauko stiprumo ir įtampos ryšys

Praktikoje, naudojantis elektros energija, žinoti įtampą tarp lauko taškų yra būtina. Įtampa visuomet nurodoma, perspėjama sutartiniais ženklais apie pavojingus aukšto potencialo taškus.

Žinant įtampą, galima naujai, žymiai paprasčiau, nusakyti ir elektrinio lauko stiprumą. Parašykime to paties darbo vienalyčiame lauke formules (22.2) ir (22.4):

$$A = Eqd,$$
$$A = qU.$$

Užrašome dešiniųjų pusių lygybę:

$$Eqd = qU;$$ iš čia

$$E = \frac{U}{d}. \qquad (22.9)$$

Vienalyčio lauko stiprumas lygus įtampos ir atstumo tarp ekvipotencialinių paviršių santykiui.

(22.9) formulę galima taikyti ir nevienalyčiam elektriniam laukui, tik atstumą d reikia imti pakankamai mažą, kad lauko stiprumo pokyčio jame būtų galima nepaisyti.

Praktinis elektrinio lauko stiprumo vienetas

Remiantis (22.9) formule nustatomas elektrinio lauko stiprumo SI vienetas **voltas metrui** (V/m). *Voltas metrui yra stiprumas tokio elektrinio lauko, kuriame 1 m nuotolyje išilgai lauko linijos įtampa pakinta 1 V.*

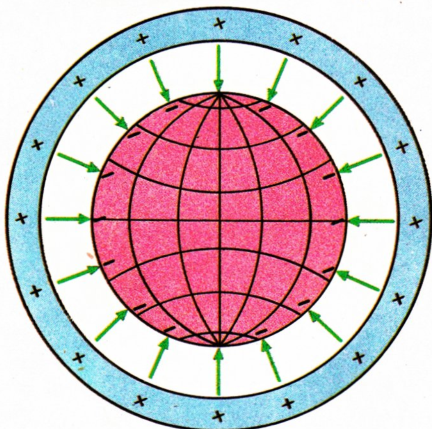
Žemės elektrinis laukas

Ištirta, kad Žemė turi neigiamą maždaug 6×10^5 C krūvį. Todėl mes gyvename stipriame Žemės elektriniame lauke. Netoli Žemės paviršiaus elektrinio lauko stiprumas vidutiniškai lygus 130 V/m. Tolstant nuo Žemės lauko stiprumas sparčiai mažėja ir 10 km aukštyje praktiškai išnyksta.

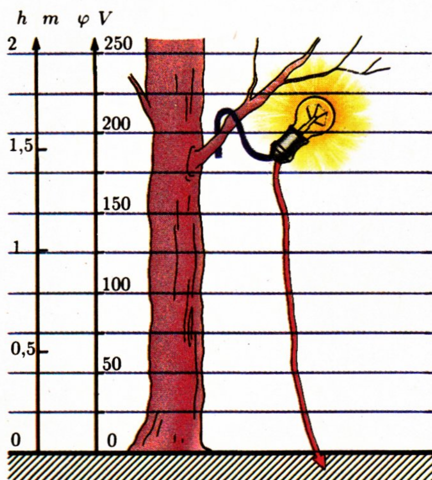
Keliasdešimties kilometrų aukštyje yra jonizuotas atmosferos sluoksnis — jonosfe-

ra, kuriame vyrauja teigiamas krūvis. Taigi Žemės elektrinio lauko linijos eina nuo jonizuoto sluoksnio į Žemės paviršių (22.3 pav.).

Kaip atsirado ir išlieka pastovus Žemės elektros krūvis, vykstant atmosferos ir kosminiams reiškiniams, galutinai neišaiškinta.



22.3 pav.



22.4 pav.

Simas Klaidelė pasiūlė nesudėtingą būdą Žemės elektrinio lauko energijai panaudoti: vieną buitinio elektros prietaiso laidą reikia prijungti prie žemės, o kitą laikyti Žemės elektriniame lauke 1,7 m aukštyje (22.4 pav.). Prietaisas turi veikti, nes pagal (22.9) formulę $U = 130$ V/m$\times$ $\times$ 1,7 m = 220 V!

▲ **22.2.** Įrodykite, kad abu elektrinio lauko SI vienetai — N/C ir V/m — yra tapatūs.

▲ **22.3.** Išreikškite SI vienetais 1 MeV energiją.

? *1. Kodėl, tolstant nuo teigiamo krūvio, lauko potencialas mažėja, o nuo neigiamo — didėja?*
2. Kodėl, krūviui judant ekvipotencialine linija, darbas lygus nuliui?

■ **22.4.** Kokį darbą atlieka elektrinis laukas, perkeldamas 4,6 μC krūvį tarp taškų, kurių potencialų skirtumas lygus 2000 V?

■ **22.5.** Elektrinį lauką vakuume kuria taškinis $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ C krūvis. Koks yra atstumas tarp dviejų ekvipotencialinių paviršių, kurių potencialai 45,0 ir 30,0 V?

■ **22.6.** Du elektros krūviai po $3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C yra ore 0,60 m atstumu vienas nuo kito. Kokį darbą reikia atlikti, norint juos suartinti iki 0,20 m?

23 paskaita

LAIDININKŲ IR DIELEKTRIKŲ SAVYBĖS

§ 23.1. Laidininkai elektriniame lauke

Laidininkais vadinamos medžiagos, turinčios daug laisvų elektringų dalelių. Laidininkai yra visi metalai, grafitas, druskų, rūgščių ir šarmų tirpalai, jonizuotos dujos, žmogaus bei gyvūnų kūnai, žemė ir daugelis organinių medžiagų. Kiekviename kubiniame centimetre metalinio laidininko yra 10^{22}—10^{23} laisvų elektringų dalelių (elektronų). Nesant elektrinio lauko, elektronai

laidininko viduje juda chaotiškai, o judėjimo intensyvumas priklauso nuo temperatūros panašiai kaip dujų molekulių. Todėl laisvųjų elektronų visuma metale vadinama **elektroninėmis dujomis** (23.1 pav., *a*).

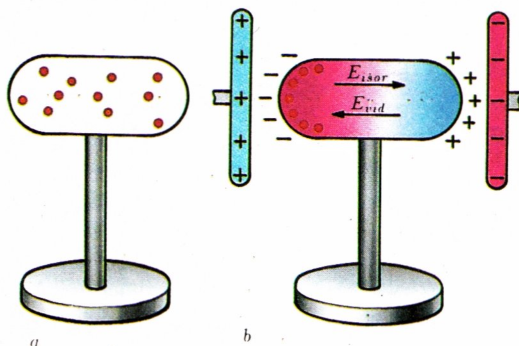
Metaliniam laidininkui patekus į elektrinį lauką, laisvieji elektronai, veikiami lauko jėgų, juda teigiamo krūvio link (priešinga lauko stiprumui kryptimi). Viename laidininko gale susikaupę elektronai sudaro neigiamą krūvį, o priešingame gale elektronų trūkumas sudaro teigiamą krūvį (23.1 pav., *b*). Taigi *elektriniame lauke laidininko atskiros dalys įsielektrina*. Šis reiškinys vadinamas **elektrostatine indukcija,** arba **įsielektrinimu įtakos būdu.**

Kaip apsisaugoti nuo elektrinio lauko

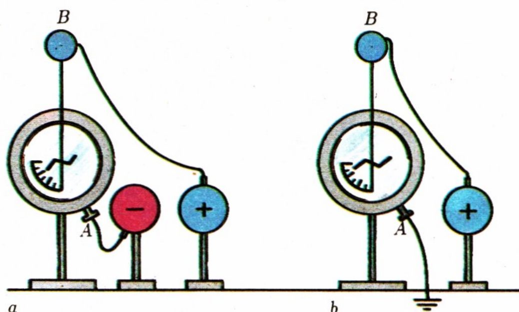
Priešinguose laidininko kraštuose atsiradę krūviai sukuria laidininke **vidinį elektrinį lauką** (E_{vid}), nukreiptą priešinga išoriniam laukui kryptimi. Kai E_{vid} tampa lygus $E_{išor}$, atstojamojo lauko stiprumas pasidaro lygus nuliui ir elektronų judėjimas baigiasi. Laidininko viduje elektrostatinis laukas išnyksta — galime sakyti, kad laidininkai savo tūryje „sunaikina" išorinį elektrinį lauką. Šiuo reiškiniu pagrįsta apsauga nuo išorinių elektrinių laukų — **ekranavimas.** Pašaliniai elektros laukai trikdo normalų elektroninės aparatūros darbą, iškraipo tikslių matavimo prietaisų parodymus, todėl jautrūs elektriniams laukams prietaisai dedami į metalinius korpusus arba apgaubiami įžemintais vieliniais tinkleliais, pro kuriuos išoriniai elektriniai laukai nepatenka į aparatūros vidų.

Įtampos ir potencialo matavimas

Metaliniu korpusu apsaugotas nuo išorinių elektrinių laukų elektroskopas vadinamas **elektrometru,** arba **elektrostatiniu voltmetru** (23.2 pav., *a*). Matuojant įtampą tarp dviejų įelektrintų laidininkų, vienas jų prijungiamas prie elektrometro korpuso (*A*),



23.1 pav.

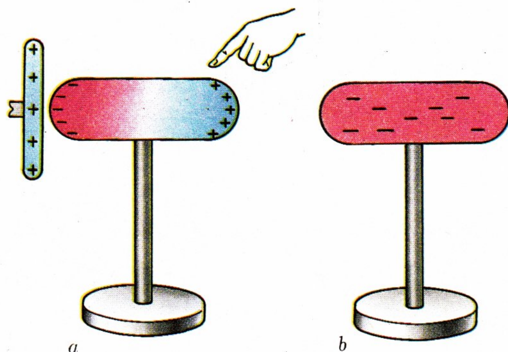


23.2 pav.

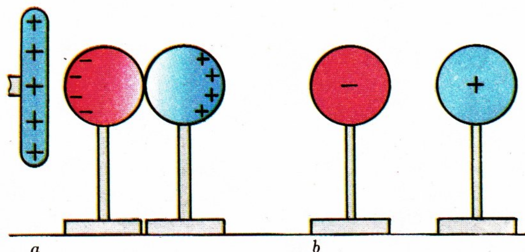
o kitas — prie izoliuoto strypo jo viduje (*B*) (23.2 pav., *a*). Norint nustatyti įelektrinto kūno potencialą žemės atžvilgiu, kūnas prijungiamas prie elektrometro strypo, o korpusas (*A*) įžeminamas (23.2 pav., *b*). Elektrometro skalė graduojama voltais.

Laidininkų įelektrinimas... išelektrinant

Išnešus įelektrintą laidininką iš elektrinio lauko, elektronai „grįžta į vietą" ir kompensuoja teigiamą krūvį, laidininkas vėl tampa neutralus. Tačiau indukuotuosius krūvius galima atskirti: jeigu vieną įelektrinto laidininko galą akimirkai sujungsime su žeme (pvz., paliesime pirštu), tai jame susikaupęs krūvis nutekės į žemę, o priešingas



23.3 pav.



23.4 pav.

krūvis liks laidininke. Dabar išnešus laidininką iš elektrinio lauko, jis liks įelektrintas (23.3 pav., *a*, *b*).

Jeigu elektriniame lauke suliesime du laidininkus ir vėl išskirsime, tai, laukui nustojus veikti, indukuotieji krūviai negalės neutralizuotis — abu laidininkai liks įelektrinti priešingais krūviais (23.4 pav., *a*, *b*).

Klysime galvodami, kad kūnams įelektrinti įtakos būdu nereikia eikvoti energijos. Atskiriant įelektrintus kūnus ir įelektrintą kūną išnešant iš lauko reikia nugalėti elektrostatinių jėgų pasipriešinimą — reikia atlikti darbą.

Perkūno strėlės

Judant orui ir vandens lašeliams debesyje, debesys gali įsielektrinti. Tarp įsielektrinusių debesų ir žemės susidaro stiprus elektrinis laukas, todėl gali įvykti atmosferos kibirkštinis išlydis — žaibas. Apsaugai nuo žaibo statomas *žaibolaidis* (perkūnsargis) — gerai įžemintas metalinis stiebas virš arba šalia saugomo statinio. Žaibolaidžiu žaibo išlydžio srovė nuteka į žemę nepadarydama žalos.

Žaibo elektrinę prigimtį įrodė amerikiečių fizikas Bendžiaminas Franklinas (1706—1790). 1753 m. B. Franklinas išrado žaibolaidį.

Retas ir menkai teištirtas atmosferos elektrinis reiškinys — *kamuolinis žaibas.* Tai švytintis 10—20 cm skersmens ugnies kamuolys, judantis nuo silpniausio oro srauto. Šis fenomenas toks unikalus, kad nei sumodeliuoti jį laboratorijoje, nei išaiškinti jo kilmę dar nepavyko.

Vilniuje įkurtas informacijos apie kamuolinį žaibą rinkimo ir apdorojimo centras. *Visus, mačiusius kamuolinį žaibą, prašome parašyti apie tai šiuo adresu: Vilnius, Goštauto 52, Puslaidininkių fizikos institutas, Plazminių reiškinių sektorius.* Tuo jūs prisidėsite prie kamuolinio žaibo paslapčių įminimo.

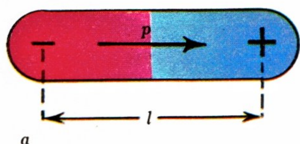
§ 23.2. Dielektrikai elektriniame lauke

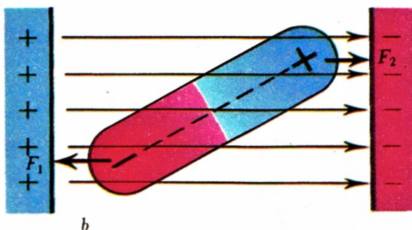
Dielektrikais vadinamos medžiagos, kuriose praktiškai nėra laisvų elektringų dalelių, galinčių pernešti elektros krūvį. Jose elektronai tvirtai „pririšti“ prie atomų ir, veikiami elektrinio lauko jėgų, negali judėti. Dielektrikai nelaidūs elektrai. Geri dielektrikai: stiklas, šilkas, guma, popierius, gintaras, plastmasės, naftos produktai, distiliuotas vanduo, dujos ir kt. Elektrotechnikoje vartojami dielektrikai vadinami *izoliatoriais*. Geri dielektrikai taip pat svarbūs elektronikai bei radioelektronikai, kaip ir geri laidininkai.

Žinios apie dielektrikų savybes būtinos

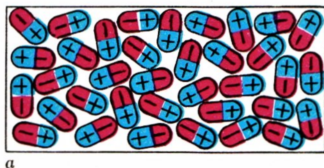
kiekvienam jau vien todėl, kad jos padės išvengti klaidų ir pavojaus naudojantis elektriniais prietaisais darbe ir buityje.

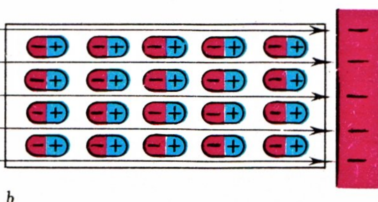
Galima pagalvoti, kad dielektrikai nedaro įtakos elektriniam laukui. Tačiau bandymai rodo kitką: *dielektrikai silpnina elektrinį lauką.* Priartinkime neįelektrintą stiklinę lazdelę prie įelektrinto elektroskopo ir pamatysime, kad jo rodyklės nukrypimas sumažės. Kaip tai galėjo atsitikti, jeigu lazdelė nebuvo įelektrinta ir joje nėra laisvų krūvio nešėjų?





23.5 pav.





23.6 pav.

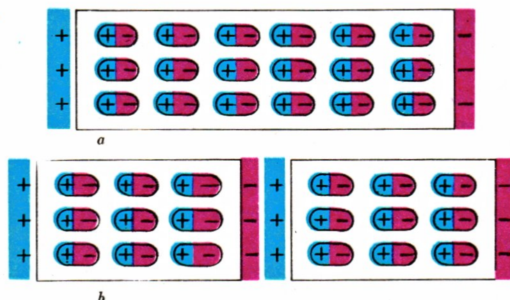
Elektriniai dipoliai

Daugelio dielektrikų molekulėse teigiamų ir neigiamų krūvių centrai nesutampa. Nors atstumas l tarp krūvių centrų tėra vos keli nanometrai, tokia molekulė yra tarsi dviejų tampriai surištų priešingų krūvių sistema — **elektrinis dipolis.** Dielektrikai, kurių molekulės — pastovūs elektriniai dipoliai, vadinami *poliniais dielektrikais.* Sandauga $p = ql$ vadinama dipolio **elektriniu momentu** (čia q — dipolio vieno ženklo krūvis). Dipolio elektrinis momentas yra vektorius, nukreiptas nuo neigiamo krūvio į teigiamą (23.5 pav., *a*). Kai $E_{išor} = 0$, dėl šiluminio judėjimo dipoliai išsidėsto netvarkingai, todėl jų laukai vieni kitus kompensuoja ir atstojamojo lauko stiprumas $E_{diel} = 0$ (23.6 pav., *a*).

Dipolių rikiuotės

Elektriniame lauke kiekvieną dielektriko dipolį veikia vienodo didumo, bet priešingų krypčių jėgos F_1 ir F_2 (23.5 pav., *b*). Tų jėgų momentas stengiasi pasukti dipolį taip, kad jo ašis eitų išilgai lauko linijos. Todėl dipoliai daugiau ar mažiau tvarkingai išsirikiuoja, atsigręždami vienodais poliais į tą pačią pusę. Dipolių elektriniai laukai susideda, ir atstojamojo lauko stiprumas E_{diel} jau nelygus nuliui (23.6 pav., *b*). Šis reiškinys vadinamas **dielektriko poliarizacija.** Jį pirmasis paaiškino vokiečių fizikas Francas Ėpinusas (1724—1802), gyvenęs ir dirbęs Peterburge. Poliarizuoto dielektriko elektrinis laukas visada priešingas išoriniam laukui, todėl dielektriko viduje elektrinis laukas susilpnėja. Medžiagos savybę daugiau ar mažiau poliarizuotis ir susilpninti lauką rodo **dielektrinė skvarba** ε, su kuria susipažinome § 20.4 (žr. XIII lentelę).

Poliarizuotieji krūviai, skirtingai nuo indukuotųjų laidininkuose, negali judėti — jie negali nei nutekėti į žemę, nei būti at-



23.7 pav.

skirti dalijant dielektriką į dalis (23.7 pav., *a, b*). Todėl jie vadinami **surištaisiais krūviais.**

Tamprieji dipoliai

Dujų, parafino, polietileno ir kai kurių kitų dielektrikų molekulės nėra elektriniai dipoliai; šios medžiagos — *nepoliniai dielektrikai*. Tačiau elektriniame lauke ir jie poliarizuojasi, bet poliarizacijos mechanizmas kitoks.

Nesant išorinio lauko, šių dielektrikų molekulėse teigiamų ir neigiamų krūvių centrai sutampa, todėl dipoliniai momentai lygūs nuliui (23.8 pav., *a*). Tačiau, pradėjus veikti išoriniam elektriniam laukui, elektronų orbitos ištįsta lauko linijų kryptimi, todėl jų atstojamojo krūvio centras molekulėje paslenka ir jau nesutampa su teigiamo krūvio centru. Atsiradę dipoliai vadinami *indukuotaisiais.* Jie kuria dielektrike vidinį elektrinį lauką. Indukuotieji dipoliai ištįsta proporcingai lauko stiprumui. Jeigu elektrinis laukas — kintamasis, tai jame esančių dielektrikų dipolių ilgis taip pat periodiškai kinta, todėl dielektrikai įkaista. Šis reiškinys panaudojamas dielektrinėms medžiagoms kaitinti arba džiovinti.

Avarijos dielektrikuose

Stiprus elektrinis laukas gali nutraukti ryšius tarp dipolio krūvių. Tada dielektrike atsiras laisvųjų krūvininkų ir įvyks kibirkštinė iškrova — **dielektriko pramušimas.** Kibirkštis ardo dielektriką. Kartą pramuštas kietas dielektrikas nustoja savo izoliacinių savybių, tampa pavojingu elektros įrenginio elementu.

Toks lauko stiprumas E_{pr}, kurį pasiekus dielektrikas pramušamas, vadinamas **pramušimo stiprumu,** o atitinkama įtampa U_{pr} — **pramušimo įtampa.** Kai dielektriko storis lygus d, tai

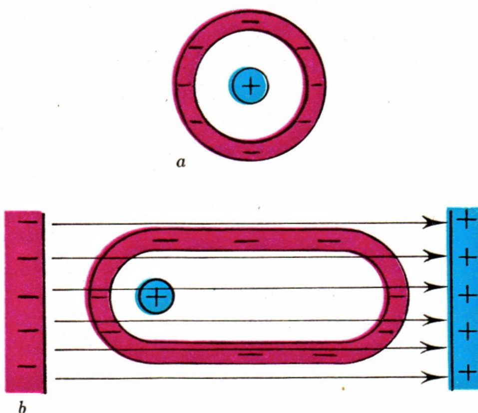
$$U_{pr} = E_{pr}d. \qquad (23.1)$$

Kad elektros įrenginiai dirbtų patikimai, kiekvieną dielektriką veikianti įtampa turi neviršyti leistinosios įtampos, kuri nustatoma 3—5 kartus žemesnė už pramušimo įtampą.

23.1. Kokia leistina įtampa 0,2 mm storio elektrokartono izoliacijai, kurios pramušimo stiprumas $8 \cdot 10^6$ V/m, jeigu atsargos koeficientas turi būti lygus 4?

Liekamoji poliarizacija

Nustojus veikti elektriniam laukui, dielektrikai paprastai išsielektrina — depoliarizuo-



23.8 pav.

jasi. Tačiau yra ir tokių dielektrikų, kaip vaškas, parafinas, žėrutis, siera ir kiti, kurie, specialiu būdu paveikti, lieka poliarizuoti ir nustojus veikti elektriniam laukui. Įelektrinimas išlieka nuo kelių dienų iki keleto metų. Tokie stabiliai poliarizuoti dielektrikai vadinami *elektretais*. Elektretai kuria aplinkoje elektrinį lauką, panašiai kaip nuolatiniai magnetai — magnetinį lauką. Elektretai naudojami dozimetrų, barometrų, higrometrų, atminties elementų gamyboje.

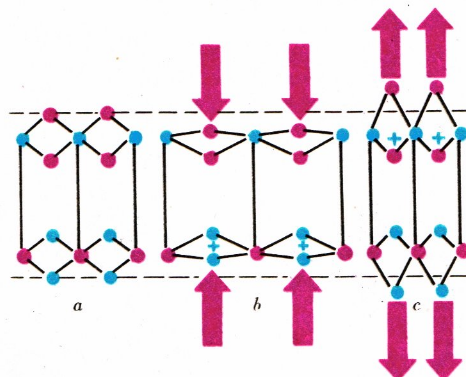
Įelektrinimas be elektros

Kvarco, turmalino ir kai kurių kitų medžiagų monokristalai poliarizuojasi juos slegiant. Tada priešinguose kristalo paviršiuose atsiranda skirtingo ženklo elektros krūviai, kurių tankis proporcingas deformacijai (23.9 pav., *a*, *b*). Šis reiškinys vadinamas **pjezoefektu.** Slėgimą pakeitus tempimu, paviršiuose atsiranda priešingų ženklų krūviai (23.9 pav., *a*, *c*).

Vyksta ir atvirkštinis pjezoefektas: elektriniame lauke tokie kristalai ilgėja arba trumpėja, priklausomai nuo lauko krypties, ir tuo daugiau, kuo laukas stipresnis. Todėl, pavyzdžiui, kvarco plokštelės paviršius kintamajame elektriniame lauke virpa ir sukelia garso arba ultragarso bangas. Dėl gebėjimo keisti mechaninius virpesius elektriniais ir atvirkščiai tokie kristalai naudojami mikrofonuose, adapteriuose, deformacijų matavimo prietaisuose, svarstyklėse, dozatoriuose ir kt. Pjezoelektriniai mechanizmai nepaprastai jautrūs. Pjezoelementai leidžia aptikti ir išmatuoti labai greitus slėgio kitimus, nefiksuojamus jokiais kitais prietaisais.

Pjezoelektrą atrado prancūzai broliai Pjeras ir Polis K i u r i 1880 m.

23.2. Kokiu atveju elektrinio lauko stiprumas kuriame nors taške ir jėga, veikianti tame taške bandomąjį krūvį, yra priešingų krypčių?



23.9 pav.

?

1. Kodėl, priartinus ranką, įelektrinto elektroskopo parodymai keičiasi, o elektrometro — ne?

2. Kodėl elektros krūvių sąveikos jėga dielektrike sumažėja?

3. Kodėl įelektrintos šukos pritraukia popieriaus skiauteles?

4. Oro pramušimo stiprumas 3000 V/mm. Nusivelkant sintetinius rūbus, mus nepiktai bado 2—3 mm ilgio kibirkštėlės. Kodėl nekrentame pakirsti aukštos įtampos?

5. Kaip adapterio adatėlė „išima" muziką iš plokštelės?

23.3. Elektrinį lauką glicerine kuria taškinis $0{,}90 \cdot 10^{-8}$ C krūvis. Apskaičiuokite dviejų taškų, nutolusių nuo krūvio 3,0 ir 12 cm, potencialų skirtumą.

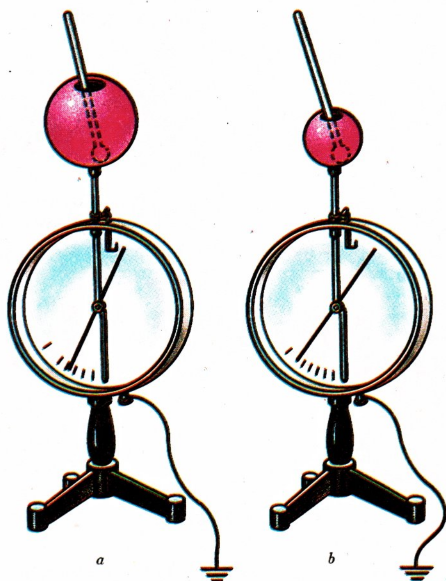
---

24 paskaita

KAIP „PRESUOJAMA" ELEKTRA

§ 24.1. Elektrinė talpa

Elektrotechnikoje dažnai reikia sukaupti vienokį ar kitokį elektros kiekį: kad kibirkštis uždegtų kuro mišinį variklyje, blykstelėtų šviesa fotografuojant ir kt. Kartais, atvirkščiai, reikia kažkur sutalpinti elektros krūvio perteklių. Kad išsiaiškintume, kur ir kaip kaupiamas elektros krūvis,



24.1 pav.

susipažinsime su dar viena laidininkų savybe — jų elektrine talpa.

Du skirtingo dydžio laidžius rutulius įelektrinkime vienodo dydžio elektros krūviais ir stebėkime prie jų prijungtus elektrometrus. Jie rodo nevienodus potencialus (24.1 pav., *a, b*). Užsibrėžus įelektrinti tuos pačius laidininkus iki vienodo potencialo, reikės jiems suteikti skirtingus krūvius. Tai rodo, kad elektros kiekis, reikalingas laidininko potencialui padidinti vienu voltu, priklauso nuo paties laidininko savybių. Fizikinis dydis, apibūdinantis laidininko sugebėjimą daugiau ar mažiau kaupti elektros krūvį, vadinamas **elektrine talpa** ir žymimas *C*. *Elektrinė talpa išreiškiama laidininko krūvio ir potencialo santykiu:*

$$C = \frac{q}{\varphi}. \qquad (24.1)$$

Elektrinės talpos vienetai

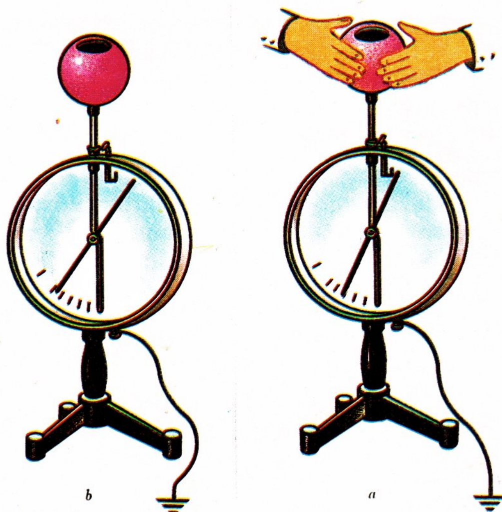
Elektrinės talpos SI vienetas yra **faradas** (F), taip pavadintas anglų fizikui Maiklui Faradėjui (1791—1867) atminti. Remiantis (24.1), 1 F = 1 C/1 V.

Faradas yra labai didelė talpa, nes kulonas — labai didelis krūvis. Todėl praktikoje vartojamos šio vieneto dalys: mikrofaradas (μF) ir pikofaradas (pF): 1 μF = 10^{-6} F; 1 pF = 10^{-12} F.

Penkios elektrinės talpos savybės

Svarbu žinoti, kas gi daro įtaką laidininkų elektrinei talpai. Tyrimai rodo, kad:

1. Elektrinė talpa *nepriklauso* nuo laidininko medžiagos. (Nepriklauso nuo medžiagos krūvių pasiskirstymo laidininke.)
2. Elektros krūviai pasiskirsto tik laidininko išoriniame paviršiuje, todėl elektrinė talpa *nepriklauso* ir nuo to, tuščiaviduris ar pilnaviduris yra laidininkas.
3. Elektrinė talpa *priklauso* nuo laidininko paviršiaus ploto.
4. Elektros krūvio pasiskirstymas priklauso nuo laidininko paviršiaus formos, todėl elektrinė talpa taip pat *priklauso* nuo laidininko formos.



24.2 pav.

5. Laidininko talpa *priklauso* nuo arti esančių kitų laidininkų ir nuo jį supančios aplinkos.

Pailiustruokime pastarąją laidininkų savybę bandymu. Atsargiai, kad nepaliestume, apgaubkime rankomis užmautą ant elektroskopo strypo įelektrintą rutulį (24.2 pav., *a, b*). Pastebėsime, kad elektroskopas rodo mažesnį potencialą — tarsi laidininkas būtų padidėjęs! Atitraukus rankas elektroskopo rodyklė grįžta į buvusią padėtį. Tą patį reiškinį matysime ir priartinę prie rutulio bet kokį kitą laidininką.

Bandymų rezultatus lengva paaiškinti: bet koks laidininkas, taigi ir žmogaus kūnas, patekęs į rutulio elektrinį lauką įsielektrina (§ 23.1). Labiausiai priartėjusiame prie rutulio paviršiuje indukuojasi priešingo ženklo krūvis ir traukia, suriša rutulio krūvį.

Rutulio potencialas dėl to sumažėja, taigi talpa padidėja. Bandymo efektas būna dar ryškesnis priartintą laidininką sujungus su žeme, nes indukavęsis to paties ženklo, kaip rutulio, krūvis nuteka į žemę. Įelektrinto kūno potencialas sumažėja — talpa padidėja — ir priartinus dielektriką. Dielektrikas poliarizuojasi, ir jo paviršiuje atsiradęs krūvis traukia, suriša laidininko krūvį.

Rutulio talpos formulė

Išvesime matematiškai paprasčiausios formos kūno — izoliuoto rutulio — talpos formulę. Talpos formulėje $C = q/\varphi$ įrašę rutulio potencialo išraišką $\varphi = K\frac{q}{\varepsilon r}$, gausime:

$$C = q : \frac{Kq}{\varepsilon r} = \frac{q\varepsilon r}{Kq};$$

$$C = \frac{1}{K}\varepsilon r. \qquad (24.2)$$

Taigi formulė patvirtina aprašytąsias talpos savybes: rutulio talpa priklauso tik nuo jo spindulio (r) ir supančio dielektriko savybių (ε).

24.1. Kad įsivaizduotumėte, kokio didumo talpos vienetas faradas, apskaičiuokite Žemės talpą.

24.2. Kokį potencialą įgijo $0{,}45 \cdot 10^{-11}$ F talpos metalinis rutuliukas, būdamas ore ir gavęs $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ C krūvį? Koks to rutuliuko spindulys?

---

§ 24.2. Kondensatoriai

Kaip „presuojama“ elektra

Praktikoje dažnai būna reikalinga sukaupti didelį elektros krūvį nedideliuose laidininkuose, veikiant ribotai įtampai. Tam panaudojama tik ką išnagrinėta aplinkinių kūnų įtaka laidininko potencialui ir talpai: arti laidininko esantis kitas laidininkas padidina jo talpą, todėl laidininke susikaupia didesnis krūvis, esant tam pačiam elektros šaltinio potencialui (iš talpos formulės (24.1) krūvis $q = C\varphi$). *Laidininkų sistema, skirta elektros krūviui kaupti, vadinama* **kondensatoriumi** (24.3 pav., *a*).

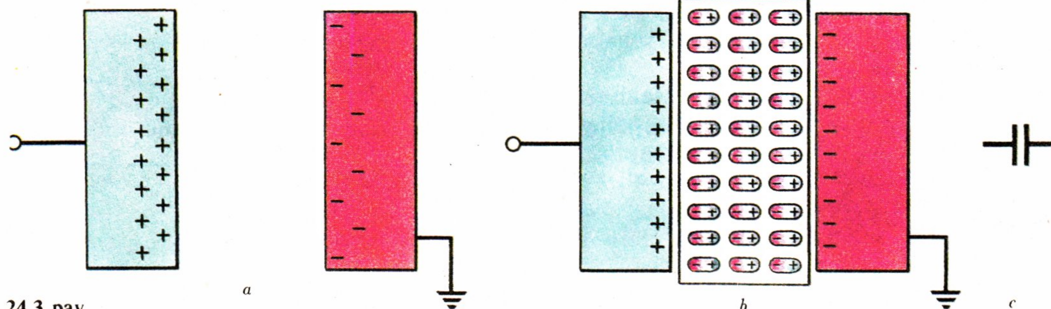
Laidininkai, kuriuose kaupiasi elektros krūviai, vadinami kondensatoriaus *elektrodais*. Elektrodai dažniausiai būna atskirti sluoksniu dielektriko, kuris kondensatoriuje atlieka dvejopą vaidmenį: pirma — neleidžia elektros krūviams susijungti ir neutralizuotis (24.3 pav., *b*), ir antra — poliarizuojasi ir tuo padidina kondensatoriaus talpą. Kaip kondensatorius žymimas schemose, parodyta 24.3 paveiksle, *c*.

Kondensatoriaus elektrine talpa vadinamas vieno elektrodo krūvio ir elektrodų potencialų skirtumo santykis:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2};$$

$$C = \frac{q}{U}. \qquad (24.3)$$

Kondensatorių galima palyginti su plieniniu balionu suspaustoms dujoms. Dujų kiekis jame susijęs su baliono talpa ir su

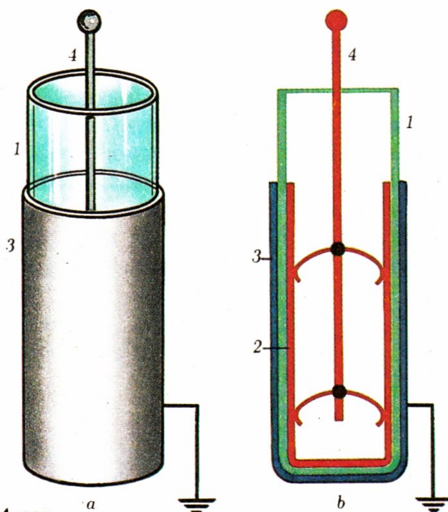


24.3 pav.

dujų slėgiu. Taip ir kondensatoriuje sukauptas elektros krūvis susijęs su kondensatoriaus talpa ir su įtampa tarp elektrodų ($q = CU$).

Nesėkmingas, bet reikšmingas bandymas

Pirmąjį kondensatorių 1745 m. sukūrė ir „išbandė“ Leideno universiteto (Olandija) fizikas Piteris M u š e n b r u k a s (1692—1761). Norėdamas „ištirpinti elektrą vandenyje“, jis didele elektros mašina elektrino vandenį, įleidęs vielą į butelį. Atjungęs vielą nuo mašinos ir laikydamas ją vienoje rankoje, kita paėmė butelį ir gavo smarkų elektros smūgį. Atsigavęs Mušenbrukas suprato, kas atsitiko, ir išrado kondensatorių, kurį šiandien vadiname **Leideno stikline** (24.4 pav., *a, b*). Leideno stiklinę sudaro stiklinis indas (*1*), iš abiejų pusių iki 2/3 aukščio apklijuotas metaline folija (*2, 3*). Folija sudaro kondensatoriaus elektrodus. Išorinis elektrodas įžeminamas, o vidinis kontaktiniu strypu (*4*) prijungiamas prie elektros šaltinio poliaus ir įkraunamas.



24.4 pav.

Plokščiojo kondensatoriaus talpa

Šiuo metu plačiai naudojami **plokštieji kondensatoriai**, sudaryti iš dviejų lygiagrečių vienas nuo kito izoliuotų metalinių elektrodų. Plokščiojo kondensatoriaus talpa apskaičiuojama pagal formulę

$$C = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon S}{d}; \qquad (24.4)$$

čia S — vieno elektrodo plotas, išreikštas m^2, d — atstumas tarp plokščių (dielektriko storis) m, ε — dielektrinė skvarba (XIII lent.).

Koeficientas ε_0 vadinamas **elektrinė konstanta**:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi K} = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \, \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}};$$

čia K — proporcingumo koeficientas iš (20.1) formulės.

Plokščiąjį kondensatorių sudarius iš n plokštelių, sujungtų kaip parodyta 24.5 paveiksle, talpa padidėja $n-1$ karto (kodėl?). Vadinasi, tokio kondensatorių bloko talpa

$$C=\varepsilon_0 \frac{\varepsilon S}{d}(n-1). \tag{24.5}$$

Kondensatorių rūšys

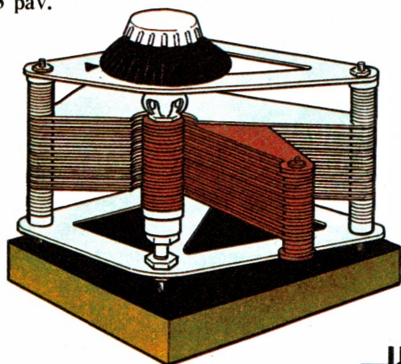
Priklausomai nuo dielektriko medžiagos kondensatoriai vadinami popieriniais, žėrutiniais, keraminiais, elektrolitiniais, oriniais ir kt. Be to, skiriami pastovios ir kintamos talpos kondensatoriai.

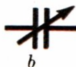
Sukiodami radijo imtuvo rankenėlę ir klausydami besikaitaliojančių įvairiakalbių transliacijų, mes suderiname imtuvą norimos stoties laidai priimti **kintamos talpos kondensatoriumi.** Tokį kondensatorių sudaro du izoliuoti vienas nuo kito metalinių plokštelių blokai. Vieno bloko plokštelės nejudamos, kito — pritvirtintos prie judamos ašies. Sukant rankenėlę, pastarosios daugiau ar mažiau įeina į tarpus tarp nejudamų plokštelių. Kondensatoriaus talpa kinta proporcingai persidengiančių plokštelių dalių plotui (24.6 pav., *a*). Kintamos talpos kondensatoriaus žymėjimas parodytas 24.6 paveiksle, *b*.

Neįmanoma išvardyti visų sričių, kur šiandien naudojami kondensatoriai. Jie plačiai paplitę elektrotechnikoje, jų rasime kiekviename radiotechnikos, laidinio ryšio, skaičiavimo technikos ir impulsinės technikos prietaise. Kondensatoriai padeda orkestro muziką išskaidyti į sudėtinius dažnius ir paversti juos įvairiaspalvės šviesos impulsais. Galingas lazerio spindulys sužadinamas šviesos impulsu, gaunamu išsikraunant didelės talpos kondensatorių baterijai.



24.5 pav.





24.6 pav. *a* *b*

24.3. Kokios talpos yra kondensatorius, kurio elektrodai — $4{,}7 \cdot 10$ m^2 ploto staniolio lakštai, atskirti 15 parafinuoto popieriaus lakštų? Lakšto storis 0,03 mm.

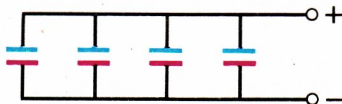
§ 24.3. Kondensatorių jungimas į baterijas

Kai reikia talpos, didesnės už pavienio turimo kondensatoriaus talpą, arba kai tinklo įtampa didesnė už leistiną vienam kondensatoriui, kondensatoriai jungiami į baterijas.

Lygiagrečiai sujungta baterija

Prireikus didesnės talpos, kondensatoriai jungiami **lygiagrečiai** — kiekvieno kondensatoriaus vienas elektrodas prijungiamas prie vieno laido, kitas elektrodas — prie kito (24.7 pav.). Aptarsime tokios baterijos savybes.

1. Aišku, kad *visų lygiagrečiai sujungtų kondensatorių įtampa vienoda*, tokia ir visos baterijos įtampa:


24.7 pav.

$$U_{bat} = U_1 = U_2 = U_3 = ... = U_n \cdot \quad (24.6)$$

Taigi šiuo atveju prie įtampą žyminčios raidės galima visai nerašyti indekso.

2. *Lygiagrečiai sujungtos baterijos krūvis lygus atskirų kondensatorių krūvių sumai:*

$$q_{bat} = q_1 + q_2 + q_3 + ... + q_n. \quad (24.7)$$

3. (24.7) formulėje įrašę q išraiškas iš (24.3), gausime:

$$C_{bat}U = C_1U + C_2U + C_3U + ... + C_nU.$$

Suprastiname iš U:

$$C_{bat} = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n, \quad (24.8)$$

arba, trumpiau užrašius,

$$C_{bat} = \sum_{i=1}^{n} C_i. \quad (24.9)$$

Lygiagrečiai sujungtos kondensatorių baterijos talpa lygi atskirų kondensatorių talpų sumai.

Jeigu lygiagrečiai jungiama n vienodos talpos kondensatorių, tai baterijos talpa n kartų didesnė už vieno kondensatoriaus talpą:

$$C_{bat} = nC_1 \cdot \quad (24.10)$$

Nuosekliai sujungta baterija

Jeigu tinklo įtampa aukštesnė už leistiną turimiems kondensatoriams, tai pramušimo galima išvengti sujungus kelis kondensatorius **nuosekliai** vieną su kitu į ištisinę grandį (24.8 pav.). Kas būdinga tokiai baterijai?


24.8 pav.

1. Jungiant kondensatorius nuosekliai, įtampa prijungiama tik prie kraštinių baterijos elektrodų, o visi vidiniai elektrodai įsielektrina indukcijos būdu vienodo didumo krūviais. Todėl, nepriklausomai nuo talpos, *visų nuosekliai sujungtų kondensatorių krūviai vienodi:*

$$q_{bat} = q_1 = q_2 = q_3 = ... = q_n. \quad (24.11)$$

Šiuo atveju prie krūvį žyminčios raidės galima nerašyti indekso.

2. Kiekvieno kondensatoriaus įtampa yra skirtinga, nes $U_1 = \frac{q}{C_1}$; $U_2 = \frac{q}{C_2}$ ir t. t. Užrašę santykių lygybę

$U_1 : U_2 = \frac{q}{C_1} : \frac{q}{C_2}$ ir pertvarkę gauname:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}.$$

Nuosekliai sujungtų kondensatorių įtampos atvirkščiai proporcingos jų talpoms.

3. Prijungta prie baterijos įtampa pasidalija tarp kondensatorių, todėl *nuosekliai sujungtos baterijos įtampa lygi atskirų kondensatorių įtampų sumai*:

$$U_{bat} = U_1 + U_2 + U_3 + ... + U_n. \quad (24.13)$$

4. Išvesime formulę baterijos talpai skaičiuoti. (24.13) formulėje įtampas išreiškę kondensatorių krūviu ir talpa, gauname:

$$\frac{q}{C_{bat}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} + \cdots + \frac{q}{C_n}. \quad (24.12)$$

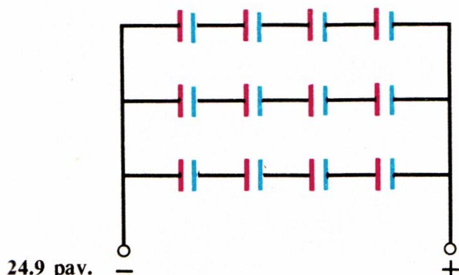
Suprastiname iš q:

$$\frac{1}{C_{bat}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + ... + \frac{1}{C_n}, \quad (24.14)$$

arba, trumpiau užrašius,

$$\frac{1}{C_{bat}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}. \quad (24.15)$$

Jeigu nuosekliai sujungiama n vienodų kondensatorių, tai kiekvienam kondensatoriui tenka įtampa, n kartų mažesnė už



24.9 pav.

prijungtąją prie baterijos, tačiau baterijos talpa n kartų mažesnė už vieno kondensatoriaus talpą:

$$C_{bat} = \frac{C_1}{n}. \qquad (24.16)$$

Kartais sudaromos **mišriai** sujungtų kondensatorių baterijos: kondensatoriai sujungiami į grupes nuosekliai, o grupės tarpusavyje jungiamos lygiagrečiai (arba atvirkščiai) (24.9 pav.).

§ 24.4. Įkrauto kondensatoriaus energija

Perkeliant krūvį q tarp elektrinio lauko taškų, tarp kurių yra pastovi įtampa U, atliekamas darbas $A = qU$. Tačiau kol kondensatoriaus elektrode susikaupia krūvis q, jo įtampa nuosekliai didėja nuo 0 iki U. Todėl, skaičiuojant įkrovimo metu atliktą darbą, reikia įrašyti daugiklį 1/2. Taigi ieškomasis darbas

$$A = \frac{qU}{2}. \qquad (24.17)$$

Tokio pat dydžio energija W ir susikaupia įkrautame kondensatoriuje.

Kondensatoriaus krūvis $q = CU$. Įrašę (24.17) formulėje šią krūvio išraišką, rasime kondensatoriaus energijos ryšį su įtampa tarp jo elektrodų:

$$W = \frac{CU^2}{2}. \qquad (24.18)$$

Ši formulė tinka bet kokios konstrukcijos kondensatoriaus energijai skaičiuoti.

▲ **24.4.** Du kondensatoriai, kurių talpa 4,0 ir 1,0 μF, sujungti nuosekliai ir prijungti prie 220 V nuolatinės įtampos šaltinio. Kokia yra bendra jų talpa? Kaip pasiskirsto įtampa tarp kondensatorių?

? *1. Ar turi elektrinę talpą neįelektrintas laidininkas?*

2. Pagal užrašytus ant kondensatoriaus korpuso duomenis nustatykite, kokį elektros krūvį galima jame sukaupti.

■ **24.5.** Kondensatorių sudaro 21 žalvario lakštas, o juos skiria 2 mm storio stiklo tarpikliai. Visi žalvario lakštai ir stiklo tarpikliai yra vienodo 200 cm^2 ploto. Lakštai sujungti į lygiagrečią kondensatorių bateriją. Apskaičiuokite jos talpą, stiklo santykinę dielektrinę skvarbą laikydami lygia 7.

■ **24.6.** Kokį krūvį reikia suteikti 0,015 μF talpos plokščiajam kondensatoriui, kad jo lauke liktų pusiausvyroje $1{,}0 \cdot 10^{-11}$ g dulkelė, netekusi 20 elektronų? Atstumas tarp elektrodų 2,5 mm.

2.2 skyrius

ELEKTROS SROVĖ METALUOSE

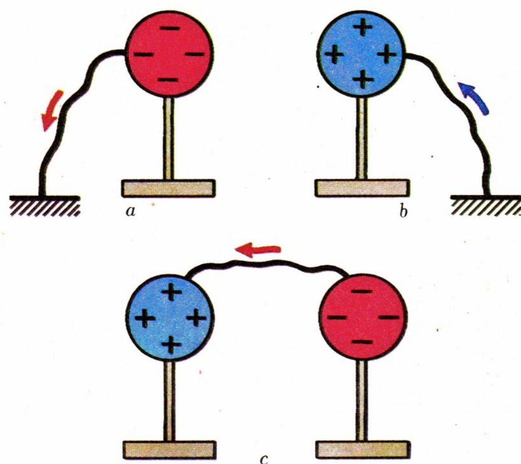
25 paskaita

PAGRINDINIS ELEKTROS SROVĖS DĖSNIS

§ 25.1. Elektros srovė

Kaip elektroninė teorija aiškina srovės atsiradimą

Įelektrintą kūną sujungus laidininku su žeme, jo krūvis išnyksta. Kas gi įvyksta? Kai krūvis neigiamas, elektronų perteklius nuteka į



25.1 pav.

žemę, o kai teigiamas, elektronų trūkumą kompensuoja laisvieji žemės elektronai (25.1 pav., *a, b*). Kūno potencialas tampa lygus žemės potencialui. Elektronai juda ir įelektrintą laidininką sujungus su kitu neįelektrintu arba skirtingai įelektrintu laidininku (25.1 pav., *c*).

Visais nagrinėtais atvejais susidūrėme su kryptingu elektronų judėjimu laidininku. *Kryptingas elektringųjų dalelių judėjimas vadinamas* **elektros srove.** Elektros srovę gali sudaryti ir judančios kitokios elektringos dalelės — jonai.

Dvi nenutrūkstamo srovės tekėjimo sąlygos

Ką tik aprašytuose bandymuose srovė teka tik akimirką — kol išsilygina sujungtų kūnų potencialai, o tada išnyksta elektrinis laukas jungiančiuose laidininkuose ir krūvių judėjimas liaujasi. Norint gauti nenutrūkstamą srovę, reikia nuolatos papildyti vieno kūno krūvį, palaikyti aukštesnį jo potencialą — sukurti laidininke *nuolatinį potencialų skirtumą* ir nuolatinį elektrinį lauką. Tai gali atlikti **srovės šaltinis** (§ 26.1), sudarantis pastovią įtampą.

Antra sąlyga: srovė gali tekėti ilgesnį laiką tik **uždara grandine.** Tokią grandinę sudaro elektros srovės šaltinis, jungiamieji laidai, elektros energijos imtuvai, jungikliai, srovės ir įtampos matavimo bei reguliavimo prietaisai. Braižant elektros grandinių schemas, grandinių elementai vaizduojami sutartiniais ženklais; kai kurie jų parodyti 25.1 lentelėje.

Lemtinga B. Franklino klaida

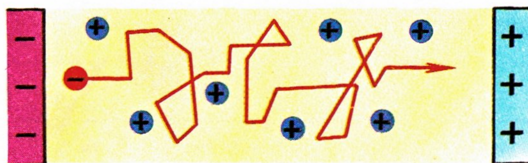
1747 m. Bendžaminas Franklinas iki tol vadintą „stiklinę“ elektrą, gautą patrynus stiklą, pavadino „teigiama“, o „gintarinę“ — „neigiama“. Kartu jis paskelbė hipotezę, kad *elektros srovė teka grandine iš šaltinio teigiamo poliaus į neigiamą,* t. y. iš didesnio potencialo taškų į mažesnio potencialo taškus. Tačiau kai lygiai po 150 metų Džordžas Tomsonas (Anglija) atrado elektroną, paaiškėjo, metaluose srovę pernešantys elektronai — neigiamos dalelės — juda ne ta kryptimi, kuria manyta tekant elektros srovę. *Elektronai grandinėje juda nuo šaltinio neigiamo poliaus, kur yra jų perteklius, link teigiamo,* t. y. priešingai nei sutartoji srovės kryptis. Tačiau nusistovėję fizikoje terminai ir įprasta srovės kryptis dėl šio atradimo nebuvo pakeista. Todėl reikia įsidėmėti, kad *sutartoji srovės kryptis ir elektronų judėjimo kryptis yra priešingos.*

Dreifuoja ne tik poliarininkai

Sujungus elektros grandinę, elektrinis laukas laidininke plinta pačiu didžiausiu gamtoje $3 \cdot 10^8$ m/s greičiu. Atsiradus laukui, elektronai laidininke juda dvejopai: be chaotiško labai intensyvaus šiluminio judėjimo jie lėtai slenka viena kryptimi (25.2 pav.). Šis kryptingas elektronų judėjimas dėl elektrinio lauko poveikio vadinamas **elektronų dreifu.** Tai ir yra elektros srovė. Vidutinis dreifo greitis, net veikiant aukštai įtampai, tėra vos keletas milimetrų per

25.1 lentelė. **Sutartiniai ženklai elektrinių grandinių schemose**

Pavadinimas	Sutartiniai ženklai: pagal galiojantį standartą	Sutartiniai ženklai: ankstesniuose leidiniuose
Elektriniai sujungimai: išardomieji	○	
neišardomieji	●	
Laidas		
Sujungimas, kai laidai išsišakoję		
Susikertantieji laidai		
Galvaninis elementas	− +	− +
Elementų baterija	− +	− +
Kištukas ir lizdas		
Kištukas ir kištukinis lizdas		
Vienpolis jungiklis		
Vienpolis dviejų padėčių perjungiklis		
Rezistorius (nereguliuojama varža)		
Reostatas (reguliuojama varža)		
Kaitinamoji lemputė		
Lydusis saugiklis		
Ritė		
Elektromagnetas		
Elektrinis skambutis		



25.2 pav.

sekundę, o chaotiško judėjimo greičiai siekia milijoną metrų per sekundę.

Srovės stiprumas

Nemunas ties Merkine kiekvieną sekundę praplukdo 250 m^3 vandens. Taigi Nemuno srovės stiprumas šioje vietoje — 250 m^3/s. Panašiai ir **elektros srovės stiprumas** laidininke (I) išreiškiamas pratekėjusio elektros krūvio (q) ir laiko (t) santykiu:

$$I = \frac{q}{t}. \qquad (25.1)$$

Srovės stiprumo SI vienetas yra **amperas (A)**. Kaip rodo (25.1) formulė, 1 A = = 1 C/1 s. Prietaisai srovei matuoti vadinami **ampermetrais.**

Srovė, kurios kryptis ir stiprumas laikui bėgant nekinta, vadinama **nuolatine srove.**

Srovės stiprumas ir elektronų greitis

Nuo ko priklauso nuolatinės srovės stiprumas metaliniame laidininke? Sakykime, laidininko skerspjūvio plotas lygus S, jo ilgis l, elektronų skaičius jo vienetiniame tūryje (elektronų koncentracija) n_0, jų dreifo greitis v.

Kadangi vieno elektrono krūvis lygus e, tai visame laidininko tūryje $V = Sl$ esančių elektronų krūvis

$$q = en_0V = en_0Sl.$$

Jeigu elektrono dreifas per visą laido ilgį trunka laiką t, tai per šį laiką pro galinį laidininko skerspjūvį turi praeiti visi pradiniu momentu buvę jame elektronai. Vadinasi, srovės stiprumas $I = \frac{q}{t}$;

$$I = en_0S\frac{l}{t}, \text{ arba}$$

$$I = en_0vS. \qquad (25.2)$$

Elektrono krūvis e ir koncentracija n_0 — pastovūs dydžiai. Kaip matome, *srovės stiprumas priklauso nuo laidininko skerspjūvio ploto ir elektronų dreifo greičio,* lygiai kaip upės srovės stiprumas — nuo jos vandens srauto skerspjūvio ploto ir tėkmės greičio.

▲ **25.1.** Laidininku, kurio skerspjūvio plotas 1,5 mm^2, teka 0,3 A srovė. Kokiu vidutiniu greičiu kryptingai juda laisvieji elektronai, jeigu jų koncentracija laidininko medžiagoje lygi 10^{28} m^{-3}?

Elektros srovės tankis

Kitas elektrotechnikoje svarbus fizikinis dydis yra **srovės tankis (j).** *Srovės stiprumo ir laidininko skerspjūvio ploto santykis vadinamas srovės tankiu:*

$$j = \frac{I}{S}. \qquad (25.3)$$

Srovės tankio SI vienetas yra A/m^2.

Pasinaudoję (25.2) formule, srovės tankį galime išreikšti mikroskopiniais dydžiais:

$$j = en_0v. \qquad (25.4)$$

Taigi *srovės tankį lemia elektronų dreifo greitis.*

▲ **25.2.** Kokio tankio srovė teka laidininku, kurio skerspjūvio plotas 1,2 mm^2, jeigu per 0,4 s praeina $6 \cdot 10^{18}$ elektronų?

---

§ 25.2. Omo dėsnis

Nuo ko priklauso dreifo greitis?

Srovės stiprumo išraiškoje (25.2) esantis elektrono krūvis e — konstanta, o elektronų

koncentracija n_0 ir plotas S — tam pačiam laidininkui pastovūs dydžiai. Taigi konkrečiu laidininku tekanti srovė tuo stipresnė, kuo didesnis elektronų dreifo greitis. O nuo ko gi priklauso šis greitis? Natūralu manyti, kad elektronų dreifo greitis priklauso nuo laidininko viduje esančio elektrinio lauko, t. y. nuo įtampos.

Vokiečių fizikas Georgas Omas 1827 m. bandymais įrodė, kad laidininku tekančios *srovės stiprumas yra tiesiog proporcingas prijungtai įtampai:*

$$I = gU. \qquad (25.5)$$

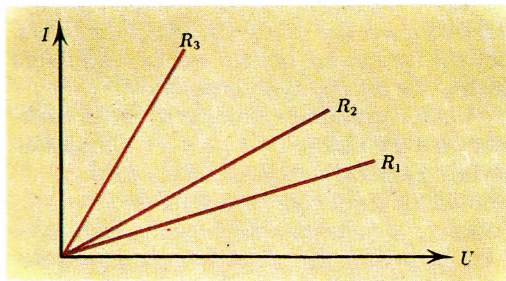
Proporcingumo koeficientas g šioje formulėje vadinamas laidininko **elektriniu laidumu.** Elektrotechnikoje labiau įprasta laidininkus apibūdinti ne laidumu g, o mums jau žinoma **varža** R. *Varža — tai laidumui atvirkštinis dydis:* $R = \frac{1}{g}$ · Taigi Omo dėsnį galime užrašyti:

$$I = \frac{U}{R} \cdot \qquad (25.6)$$

Srovė laidininke tiesiog proporcinga įtampai ir atvirkščiai proporcinga laidininko varžai.

Omo dėsnio grafinis vaizdas

Srovės stiprumo priklausomybės nuo įtampos grafikas vadinamas laidininko **voltamperine charakteristika.** Visų metalinių laidininkų voltamperinės charakteristikos yra tiesės, einančios per koordinačių pradžią (25.3 pav.).



25.3 pav.

Kuo mažesnė laidininko varža, tuo stipresnė srovė, tuo stačiau kyla aukštyn jo voltamperinė charakteristika.

§ 25.3. Laidininkų varža

Prisiminkime, ką žinome apie varžą

Su varžos sąvoka esame susipažinę pirmajame fizikos kurse: *varža vadinama medžiagos savybė priešintis elektros srovei.* Varža, kaip fizikinis dydis, išreiškiama, remiantis Omo dėsniu (25.6), laidininko įtampos ir laidininku tekančios srovės stiprumo santykiu:

$$R = \frac{U}{I} \cdot \qquad (25.7)$$

SI varžos vienetas yra omas (Ω) : 1 Ω = = 1 V/1 A.

Omas — tai varža tokio laidininko, kuriuo teka 1 A srovė, kai įtampa tarp laidininko galų lygi 1 V.

10^3 Ω = 1 kΩ (kiloomas); 10^6 Ω = = 1 MΩ (megaomas).

Elektros grandinės elementai, skirti varžai sudaryti, vadinami **rezistoriais.**

Žinome, kad *laidininko varža yra tiesiog proporcinga jo ilgiui ir atvirkščiai proporcinga skerspjūvio plotui:*

$$R = \varrho \frac{l}{S} \cdot \qquad (25.8)$$

Šioje formulėje esantis proporcingumo koeficientas ϱ vadinamas medžiagos **specifine varža.** Dažniausiai sutinkamų laidininkų specifinės varžos surašytos XIV lentelėje. Specifinės varžos SI vienetas yra Ω · m (patikrinkite remdamiesi (25.6) formule).

Kartais vietoje varžos būna patogiau vartoti medžiagos *laidumą,* kuris, kaip jau minėjome, yra atvirkštinis varžai dydis:

$$g = \frac{1}{R}. \qquad (25.9)$$

Vadinasi, kuo didesnė varža, tuo mažesnis laidumas, ir atvirkščiai. Laidumo SI vienetas vadinamas **simensu** ir žymimas S : 1 S = 1/1 Ω.

▲ **25.3.** 4,8 m ilgio nichrominio laido varža 24 Ω. Apskaičiuokite jo skersmenį.



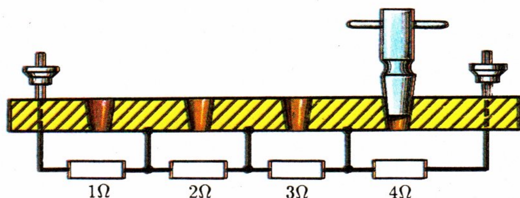
Simas Klaidelė susikaupęs sprendė uždavinį:
25.4. Kiek reikia vario 5,0 km ilgio perdavimo linijai, kurios varža 5,0 Ω?
Nusibraižęs sąlygoje aprašytą fizikinę situaciją, Simas logiškai aiškino sprendimo eigą:
„Vario masę galima rasti tik iš tankio formulės $\varrho = m/V$, iš jos $m = \varrho V$.
Laido geometrinė forma yra ritinys, o ritinio tūris $V = Sl$. Tad vario masė $m = \varrho lS$. Vario tankis žinomas (I lentelė), laido ilgis nurodytas sąlygoje 5 km × 2 = 10 km. Tereikia iš varžos formulės (25.8) išreikšti laido skerspjūvio plotą $S = \varrho l/R$ ir įrašyti į ieškomos masės formulę:

$$m = \varrho l \frac{\varrho l}{R} = \frac{\varrho^2 l^2}{R}.$$

Dešinėje lygties pusėje visi dydžiai žinomi iš sąlygos arba randami lentelėse. Taigi bendru pavidalu uždavinys išspręstas."
Šis rezultatas buvo pripažintas klaidingu. Kur Simas suklydo?
Ar pagrįstai Simas Klaidelė įrodinėjo, kad klaida įsivėlusi ne dėl jo nenuovokumo?

? *1. Kodėl lygybės $R = U/I$ negalima perskaityti šitaip: „Laidininko varža yra tiesiog proporcinga įtampai ir atvirkščiai proporcinga srovei"?*
2. 25.3 paveiksle parodytos trijų laidininkų voltamperinės charakteristikos. Kurio laidininko varža didžiausia?
3. Kokias varžas galima sudaryti varžynu (25.4 pav.), turint du kištukus?

25.5. Kiek sveria varis, iš kurio galima pagaminti 0,500 mm² skerspjūvio ploto 1,72 Ω varžos vielą?
25.6. Neišvynioję izoliuoto nichrominio laido, nustatykite jo ilgį iš šių duomenų: įjungus ritę į 120 V įtampos tinklą, teka 1,2 A srovė, o laido skerspjūvio plotas 0,55 mm².



25.4 pav.

26 paskaita

ENERGIJOS TVERMĖS DĖSNIS ELEKTROS GRANDINĖMS

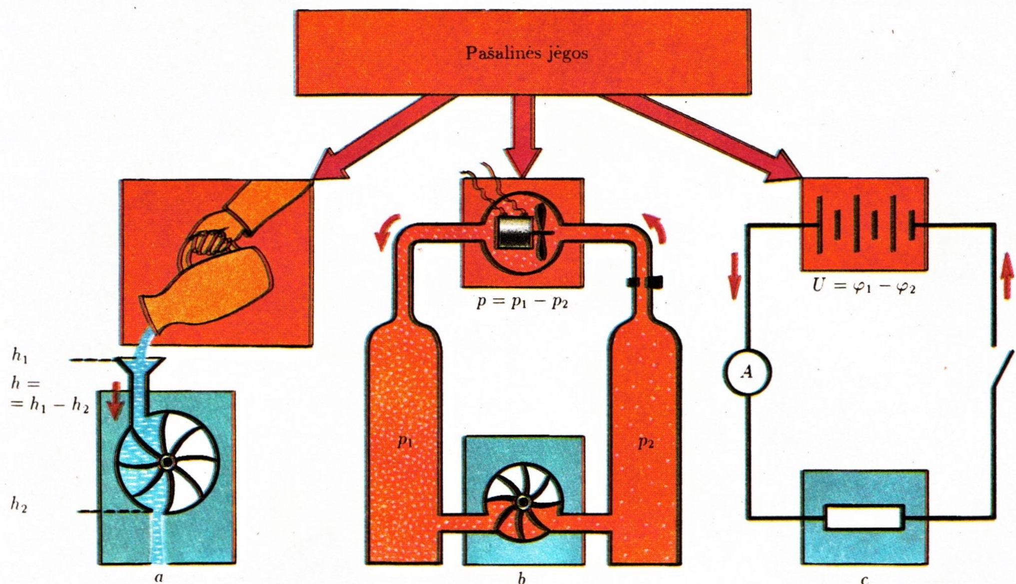
§ 26.1. Omo dėsnis uždarai grandinei

Aiškinant srovės atsiradimo priežastis (§ 25.1), buvo nurodytos dvi nenutrūkstamo srovės tekėjimo sąlygos: *turi būti uždara grandinė ir joje įjungtas srovės šaltinis.* Panagrinėkime nuodugniau, kaip atsiranda, teka ir dirba elektros srovė.

Dvi uždaros grandinės dalys

Uždarą elektros grandinę sudaro dvi iš esmės skirtingos dalys: **išorinė** ir **vidinė**. Išorinė grandinės dalis — tai visa, kas yra prijungta prie šaltinio gnybtų. *Išorinė grandinės dalis vartoja elektros energiją — joje elektros energija virsta kitų rūšių energija.* Išorinės grandinės dalies varža vadinama **išorine varža** (ją žymėsime R).

Vidinė grandinės dalis yra paties elektros srovės šaltinio vidus — laidininkai, kuriais juda elektringos dalelės šaltinio viduje. Galvaniniame elemente — tai elektrolitas ir elektrodai, generatoriuje — inkaro apvija ir kt. *Vidinėje grandinės dalyje kitų rūšių energija virsta elektros energija.* Vidinės grandinės dalies varža



26.1 pav. Pašalinės jėgos: *a* **— mechaniniame uždaros elektros grandinės modelyje;** *b* **— pneumatiniame uždaros elektros grandinės modelyje;** *c* **— uždaroje elektros grandinėje**

vadinama **vidine varža**; ją žymėsime raide *r*.

Kas vyksta elektros srovės šaltinyje?

Taigi elektros srovės šaltinyje kokios nors rūšies energija nenutrūkstamai virsta elektros energija. Galvaniniame elemente toji pirminė energija yra cheminė, generatoriuje — mechaninė, termoelemente — šiluminė ir kt. Neelektrinės kilmės jėgų verčiami elektronai šaltinio viduje juda prieš elektrostatinio lauko jėgas — nuo teigiamo poliaus į neigiamą. Šaltinio gnybtuose kaupiasi priešingų ženklų krūviai ir palaiko pastovų potencialų skirtumą. Neelektrinės kilmės jėgos, veikiančios elektros srovės šaltinyje, vadinamos **pašalinėmis jėgomis** (26.1 pav., *c*). Pašalinių jėgų veikimą galima vaizdžiai pademonstruoti mechaniniu arba pneumatiniu modeliu (26.1 pav., *a*, *b*)

Ar „elektrovaros jėga" — jėga?

Pašalinių jėgų darbą elektros šaltinyje apibūdina fizikinis dydis, vadinamas šaltinio **elektrovaros jėga** (trumpiname EVJ arba žymime raide E). Šaltinio evj yra pašalinių jėgų atlikto darbo A perkeliant krūvį q ir to krūvio santykis:

$$E = \frac{A}{q}\,. \qquad (26.1)$$

Vadinasi, elektrovaros jėga yra įtampai analogiškas dydis (žr. § 22.2). EVJ SI vienetas, kaip ir įtampos, yra voltas: 1 J/1 C = = 1 V.

Taigi *šaltinio EVJ yra lygi 1 V, jeigu, pašalinėms jėgoms jame atliekant 1 J darbą, grandine prateka 1 C elektros krūvis.*

Kišeninės baterijos evj 4,5 V. Tai reiškia, kad vieno kulono krūviui perkelti grandine šaltinyje suvartojama 4,5 J kitos rūšies energijos.

Energijos tvermės dėsnis grandinei

Visi energijos virsmai pavaldūs energijos tvermės dėsniui, nors kiekviename fizikiniame procese jie vyksta savaip.

Pritaikykime energijos tvermės dėsnį tiems energijos virsmams, kurie vyksta uždaroje elektros grandinėje.

Sakykime, srovės šaltinyje pašalinės jėgos atliko darbą A (tiek kitos rūšies energijos virto elektros energija) ir dėl to grandine pratekėjo krūvis q. Tekant srovei, tas pats krūvis išorinėje grandinės dalyje atliko darbą $A_{išor}$, o vidinėje grandinės dalyje — darbą A_{vid}. Remiantis energijos tvermės dėsniu galima tvirtinti, kad

$$A = A_{išor} + A_{vid} . \qquad (26.2)$$

Padalykime visus šios lygybės narius iš pratekėjusio krūvio q:

$$\frac{A}{q} = \frac{A_{išor}}{q} + \frac{A_{vid}}{q} .$$

Prisiminę (26.1) ir (22.4) formules, galime rašyti:

$$E = U_{išor} + U_{vid} . \qquad (26.3)$$

Šaltinio EVJ yra lygi grandinės išorinės ir vidinės dalių įtampų sumai. Taip galime formuluoti energijos tvermės dėsnį uždarai elektros grandinei.

Omo dėsnis uždarai grandinei

Pritaikykime Omo dėsnį atskirai išorinei ir vidinei grandinės dalims. Uždaroje grandinėje krūvis niekur negali kauptis, todėl srovės stiprumas abiejose dalyse vienodas, taigi galime parašyti:

$$U_{išor} = IR,$$
$$U_{vid} = Ir.$$

Įrašykime šias išraiškas į (26.3) lygybę:

$$E = IR + Ir; \qquad (26.4)$$

iš čia

$$I = \frac{E}{R + r} . \qquad (26.5)$$

Uždara grandine tekančios srovės stiprumas yra tiesiog proporcingas šaltinio EVJ ir atvirkščiai proporcingas išorinės ir vidinės varžų sumai. Tai — **Omo dėsnis uždarai grandinei.**

Kaip išmatuoti EVJ

(26.3) formulę pertvarkome šitaip: $U_{išor} = E - U_{vid}$, arba $U_{išor} = E - Ir$. Jeigu elektros grandinė išjungta, tai $I = 0$. Tada $U_{išor} = E$.

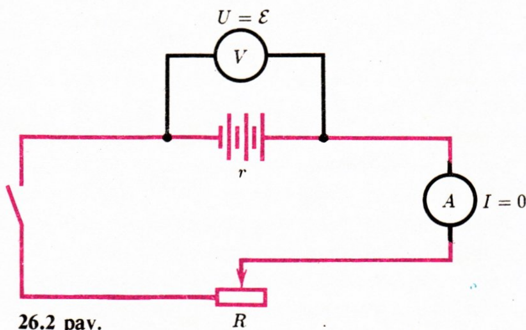
Esant išjungtai grandinei, šaltinio gnybtų įtampa lygi jo EVJ. Taigi, norint išmatuoti elektros šaltinio EVJ, reikia prie jo gnybtų prijungti didelės varžos voltmetrą, o išorinę grandinę atjungti (26.2 pav.).

Trumpojo jungimo srovė

Šaltinio gnybtų sujungimas labai mažos varžos ($R \to 0$) laidininku vadinamas **trumpuoju jungimu.** Tokiu atveju srovės stiprumas grandinėje priklauso tik nuo vidinės varžos r:

$$I = \frac{E}{r} . \qquad (26.7)$$

Jeigu šaltinio vidinė varža maža (pavyzdžiui, akumuliatoriaus ar generatoriaus), tai trumpojo jungimo srovė gali būti neleistinai didelė. Dėl to gali įkaisti ir net išsilydyti laidai, susvilti izoliacija, gali sugesti pats šaltinis. Trumpasis sujungimas yra dažna gaisrų priežastis.



26.2 pav.

Pavyzdys. Voltmetras, prijungtas prie galvaninio elemento gnybtų, rodė 1,2 V, kai tekėjo 4,40 A srovė, ir 1,0 V, kai tekėjo 0,80 A srovė. Apskaičiuokite elemento EVJ ir vidinę varžą. Kokią stipriausią srovę galima iš jo gauti (26.2 pav.)?

S p r e n d i m a s. Ieškomiesiems dydžiams — elemento EVJ ir vidinei varžai — rasti būtina naudoti Omo dėsnio uždarai grandinei formulę

$$I=\frac{E}{R+r}.$$

Taikydami ją dviem sąlygoje aprašytiems atvejams, sudarome dviejų lygčių sistemą, kurioje nežinomieji ir yra E bei r:

$$I_1=\frac{E}{R_1+r},$$

$$I_2=\frac{E}{R_2+r}.$$

Iš čia

$$E\cong I_1R_1+I_1r,$$
$$E=I_2R_2+I_2r.$$

Kadangi $IR=U$, tai

$$E=U_1+I_1r,$$
$$E=U_2+I_2r.$$

Užrašome dešinių pusių lygybę:

$$U_1+I_1r=U_2+I_2r,$$
$$U_1-U_2=I_2r-I_1r,$$
$$r=\frac{U_1-U_2}{I_2-I_1}.$$

Gautąją išraišką įrašome į pirmąją lygtį:

$$E=U_1+I_1\frac{U_1-U_2}{I_2-I_1}.$$

Srovės stiprumas bus didžiausias trumpojo jungimo atveju — kai $R=0$:

$$I_{max}=E/r.$$

Sąlygoje pateikti duomenys:

$U_1=1{,}2$ V,
$I_1=0{,}4$ A,
$U_2=1$ V,
$I_2=0{,}8$ A.

Apskaičiuojame:

$$r=\frac{1{,}2-1}{0{,}8-0{,}4}\ \Omega=0{,}5\ \Omega.$$

$$E=1{,}2+0{,}4\cdot 0{,}5\ \text{V}=1{,}4\ \text{V};$$

$$I_{max}=\frac{1{,}4}{0{,}5}\ \text{A}=2{,}8\ \text{A}.$$

Ats. $r=0{,}5\ \Omega$, $E=1{,}4$ V, $I_{max}=2{,}8$ A.

26.1. Prijungus prie galvaninio elemento 6,0 Ω varžos laidininką, teka 0,30 A srovė, o prijungus 14 Ω varžos laidininką, teka 0,15 A srovė. Apskaičiuokite trumpojo jungimo srovę.

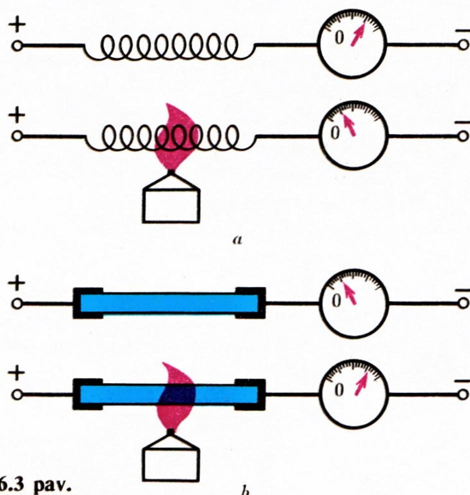
§ 26.2. Varžos priklausomybė nuo temperatūros

Kaip veikia elektrinis termometras?

Pakaitinkime spiritinės lemputės liepsnoje įjungtą į elektros grandinę metalinę spiralę ir pakartokime šį bandymą su anglies strypeliu (26.3 pav., *a, b*). Pastebėsime, kad pirmuoju atveju srovės stiprumas sumažėjo, o antruoju — padidėjo. Taigi varža priklauso ne tik nuo laidininko medžiagos ir matmenų, bet ir nuo temperatūros.

Metaliniame laidininke, kylant temperatūrai, didėja laisvųjų elektronų chaotiško judėjimo greitis, intensyvėja atomų virpesiai, dažnėja elektronų susidūrimai su atomais. Dėl to mažėja elektronų dreifo greitis ir srovės stiprumas, o tai tolygu laidininko varžos didėjimui. *Visų metalų varža kylant temperatūrai didėja.*

Anglyje, elektrolituose ir puslaidinin-



26.3 pav.

kiuose, kylant temperatūrai, daugėja laisvų elektringų dalelių vienetiniame tūryje, todėl jų varža mažėja. Derinant priešingų savybių medžiagas, galima gauti lydinius, kurių varža beveik nepriklauso nuo temperatūros (pvz., konstantanas, manganinas ir kt.). Iš jų gaminamos etaloninės varžos, elektrinių matavimo prietaisų detalės.

Stebinantis sutapimas

Varžos kitimui, kintant temperatūrai, aprašyti įvesime analogišką dydį kaip kūno šiluminiam plėtimuisi aprašyti (§ 18.2) — *santykinį varžos pokytį* ε. Santykiniu varžos pokyčiu vadinsime varžos pokyčio ΔR ir pradinės varžos santykį:

$$\varepsilon=\frac{\Delta R}{R_0}=\frac{R-R_0}{R_0}; \qquad (26.8)$$

čia R_0 — laidininko varža 0 °C temperatūroje, R — varža temperatūroje t. Eksperimentais įrodyta, kad, kaip ir santykinis pailgėjimas, *santykinis varžos pokytis yra proporcingas temperatūros pokyčiui*:

$$\varepsilon=\alpha\Delta t. \qquad (26.9)$$

Kai pradinė laidininko temperatūra $t_0=0$ °C, pokytis $\Delta t=t-0=t$. Proporcingumo koeficientas α šioje formulėje vadinamas **temperatūriniu varžos koeficientu.** *Temperatūrinis varžos koeficientas rodo santykinį laidininko varžos pokytį temperatūrai pakitus 1 °C.*

α matuojamas K^{-1}. Įvairių laidininkų temperatūriniai varžos koeficientai nurodyti XV lent. Grynų metalų temperatūriniai varžos koeficientai beveik vienodi ir apytiksliai lygūs 0,004 K^{-1}, t. y. 1/273 K^{-1}! Ar tai — atsitiktinis sutapimas? Ne, jis dar kartą patvirtina, kad laisvųjų elektronų būsena metale primena dujų būseną.

Įkaitinto laidininko varžos formulė

Įrašę varžos santykinio padidėjimo ε išraišką (26.8) į (26.9) formulę, gausime:

$$\frac{\Delta R}{R_0}=\alpha t;$$

iš čia

$$\alpha=\frac{\Delta R}{R_0 t}. \qquad (26.10)$$

Pagal šią formulę patogu apskaičiuoti iš bandymo duomenų temperatūrinį varžos koeficientą. Praktikoje dažniausiai tenka skaičiuoti laidininko varžą R įvairioje temperatūroje.

Į pastarąją formulę įrašome išraišką $\Delta R=R-R_0$:

$$R-R_0=\alpha R_0 t;$$

iš čia

$$R=R_0+R_0\alpha t,$$

$$R=R_0(1+\alpha t). \qquad (26.11)$$

Jeigu temperatūra kinta ne nuo 0 °C, o nuo t_1 iki t_2, tai temperatūrinis varžos koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę

$$\alpha=\frac{R_2-R_1}{R_1 t_2-R_2 t_1}. \qquad (26.12)$$

▲ **26.2.** Anglies strypelio temperatūrai pakilus nuo 50 iki 545 °C, jo varža sumažėjo nuo 5,0 iki 4,5 Ω. Apskaičiuokite anglies temperatūrinį varžos koeficientą. Ką reiškia atsakyme minuso ženklas?

---

§ 26.3. Superlaidumas

Krintant temperatūrai, metalų varža palaipsniui mažėja. Tačiau šis procesas vyksta tik iki tam tikros ribos — pasiekus itin žemą temperatūrą, paprastai 3—6 K virš absoliutinio nulio, laidininko varža staiga beveik visai išnyksta!

Šis reiškinys vadinamas **superlaidumu.** Temperatūra, žemiau kurios laidininkas nustoja varžos, vadinama **krizine temperatūra.** Švino krizinė temperatūra — 7,2 K, gyvsidabrio — 4,1 K, alavo — 3,7 K, aliuminio — 1,2 K. Ne visi laidininkai pereina

į superlaidžiąją būseną — varis, auksas, sidabras, platina, kad ir kaip šaldomi, nevirsta superlaidininkais. Superlaidumo reiškinys atvėrė didžiules perspektyvas elektrotechnikai ir elektronikai. Superlaidžiame žiede arba uždaroje ritėje kartą sužadinta srovė teka praktiškai nesilpnėdama metus ir ilgiau. 1 mm^2 skerspjūvio ploto švinine viela gali tekėti 1000 A srovė, jos nė kiek nešildydama. Srovė superlaidininkais teka neprarasdama energijos. Elektromagnetais, kurių apvija suvyniota iš superlaidininko, sukuriami labai stiprūs ir stabilūs magnetiniai laukai.

Superlaidumą tiria žemųjų temperatūrų fizika (kriofizika). Šiuo metu fizikai sprendžia problemą, kaip sukurti superlaidžias medžiagas normalioje temperatūroje. 1987 m. Šveicarijoje, Prancūzijoje ir Sovietų Sąjungoje susintetintos keraminės medžiagos, kurios pereina į superlaidžiąją būseną 90—250 K temperatūroje, t. y. vos 23 laipsniais žemesnės už 0 °C. Unikalūs superlaidininkai sukels perversmą daugelyje technikos sričių. Artimiausioje ateityje laukiama svarbių mokslo, technikos ir ekonomikos rezultatų.

Pirmasis gyvsidabrio superlaidumą atrado 1911 m. danų fizikas Heikė Kamerlingas-Onesas. Už superlaidumo teorinį paaiškinimą (1957 m.) amerikiečiai Džonas Bardynas, Leonas Kuperis ir Džonas Robertas Šriferis buvo apdovanoti Nobelio premija (1972 m.).

?

1. Ventiliatoriaus varomų dujų cirkuliacija panaši į krūvių judėjimą elektrine grandine (26.2 pav., c). Paaiškinkite dujų kontūro ir elektrinės grandinės analogiją. Ką atitinka ventiliatorius, ventilis, plonas vamzdelis, slėgių skirtumas rezervuaruose $p_1 - p_2$?

2. Ant baterijos „Syrius" užrašyta: „EVJ 4,5 V", o ant prie jos jungiamos lemputės — 3,5 V. Kodėl taip yra?

3. Kodėl 26.3 paveiksle atvaizduotoje grandinėje, ją nutraukus voltmetras rodo daugiau voltų?

4. Remdamiesi (26.10) ir (25.6) formulėmis, įrodykite, kad

$$\alpha = \frac{\Delta\varrho}{\varrho_0 t}. \qquad (26.13)$$

5. Išveskite (26.12) formulę.

26.3. Kai elektrinės kaitinamosios lempos volframinis siūlas įkaista iki 2100 °C, jo varža būna 484 Ω. Apskaičiuokite siūlo varžą 20 °C temperatūroje.

26.4. Termoporai gaminti imamas konstantano vielos gabalas, kurio masė 89 g, o skerspjūvio plotas 0,10 mm^2. Kokia bus jos varža 100 °C temperatūroje?

Pakartokite § 24.3.

---

27 paskaita

UNIVERSALŪS JUNGIMO BŪDAI

§ 27.1. Elektros imtuvų jungimo būdai

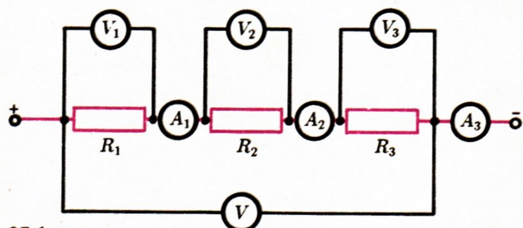
Išorinę elektros grandinę paprastai sudaro ne vienas, o daug įvairios paskirties elementų — elektros imtuvų, vartojančių elektros energiją, jungiamųjų laidų, matavimo ir valdymo prietaisų. Kaip juos sujungti tarpusavyje ir kaip apskaičiuoti tokioje grandinėje veikiančias įtampas, tekančias sroves, bendrą (ekvivalentinę) varžą — vieni svarbiausių praktinės elektrotechnikos klausimų.

Yra du pagrindiniai elektros imtuvų jungimo būdai: *nuoseklusis ir lygiagretusis.*

Tik vienas kelias

Nuosekliuoju vadinamas toks jungimas, kai grandinės elementai jungiami paeiliui, vienas po kito, t. y. vieno laidininko galas jungiamas su kito laidininko pradžia ir t. t. Nuosekliai sujungta grandinė neturi atšakų (27.1 pav.). Išsiaiškinsime jos skaičiavimo taisykles.

1. *Nuosekliai sujungtoje grandinės dalyje srovės stiprumas visur vienodas:*



27.1 pav.

$$I_1 = I_2 = I_3 = I. \qquad (27.1)$$

Tuo galime įsitikinti, įjungę ampermetrą įvairiose grandinės vietose. Kita vertus, tai, galima sakyti, aišku savaime. Elektros krūviui judant grandinės laidininkuose atliekamas darbas, eikvojama energija, bet patys krūviai niekur nedingsta ir nesusikaupia. Taip ir nuo užtvankos krintantis vanduo suka turbiną ir atiduoda jai tik savo energiją.

2. Ką galime pasakyti apie kiekvieno nuosekliai prijungto grandinės elemento įtampą? Sakykime, tų elementų varžos R_1, R_2, R_3... Remdamiesi Omo dėsniu, galime parašyti:

$$IR_1 = U_1,\ IR_2 = U_2,\ IR_3 = U_3.$$

Padaliję vieną lygybę iš kitos, gauname:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_3}. \qquad (27.2)$$

Vadinasi, *nuoseklioje grandinėje atskirų dalių įtampos tiesiog proporcingos jų varžoms.*

Tuo galime įsitikinti bandymu, prijungę voltmetrą prie kiekvieno grandinės elemento galų.

3. O kokia yra bendra įtampa? Remiantis energijos tvermės dėsniu (ir voltmetrų parodymais) galima tvirtinti, kad visos *nuosekliai sujungtos grandinės įtampa lygi atskirų dalių įtampų sumai*:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \qquad (27.3)$$

4. Pagaliau išsiaiškinkime, kaip apskaičiuoti bendrą varžą. (27.3) lygybėje įrašykime įtampų išraiškas iš Omo dėsnio:

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3.$$

Suprastinę iš I, gauname:

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \qquad (27.4)$$

Vadinasi, *nuosekliai sujungtos grandinės bendra varža lygi atskirų dalių varžų sumai.*

Grandinės bendra varža (R) vadinama **ekvivalentine varža.**

Nuosekliai jungiami į grandinę ampermetrai, jungikliai, reostatai, iš nuosekliai sujungtų lempučių sudarytos girliandos eglutėms iliuminuoti ir kt. Jeigu turimo šaltinio įtampa elektros imtuvui per didelė, ją galima padalyti prijungiant nuosekliai kitą imtuvą. Norint kokį nors imtuvą įjungti į grandinę nuosekliai, reikia grandinę toje vietoje nutraukti ir prie atsiradusių galų prijungti imtuvą. Grandinei nutrūkus nors vienoje vietoje, pavyzdžiui, perdegus vienam elementui, srovė nutrūksta visoje nuosekliai sujungtoje grandinėje.

▲ **27.1.** Prie nuolatinės įtampos šaltinio nuosekliai prijungti 3 laidininkai, kurių varžos 10, 16 ir 18 Ω. Įtampos kritimas antrame laidininke 80 V. Apskaičiuokite ekvivalentinę varžą, grandine tekančią srovę, įtampos kritimą pirmame ir trečiame laidininkuose, šaltinio gnybtų įtampą.

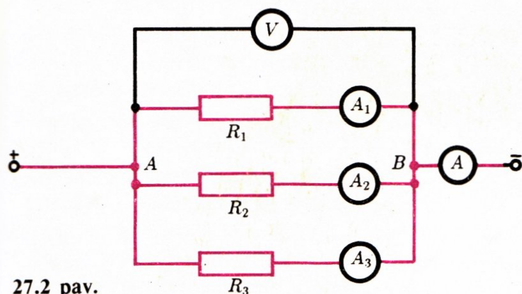
Keliai šakojasi

Lygiagrečiuoju vadinamas toks jungimas, kai vieni grandinės elementų gnybtai jungiami į vieną mazgą (A), o kiti — į kitą (B). Tarp dviejų grandinės mazgų sudaromos atskiros šakos (27.2 pav.). Išsiaiškinsime, kaip apskaičiuojami šakotos grandinės parametrai.

1. *Visų lygiagrečiai sujungtų grandinės šakų įtampa vienoda*:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U. \qquad (27.5)$$

2. Grandinės mazguose A ir B elektros krūviai nesikaupia. Todėl *į mazgą*



27.2 pav.

įtekančių ir iš jo ištekančių srovių sumos yra lygios:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \qquad (27.6)$$

3. Kaip pasiskirsto elektros srovė mazge į atskiras šakas? Įrašykime (27.5) lygybėje įtampos išraiškas iš Omo dėsnio:

$I_1 R_1 = I_2 R_2$; iš čia

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Atskiromis šakomis tekančių srovių stiprumai atvirkščiai proporcingi tų dalių varžoms.

4. Išsiaiškinkime, kaip apskaičiuoti išsišakojusios dalies varžą.

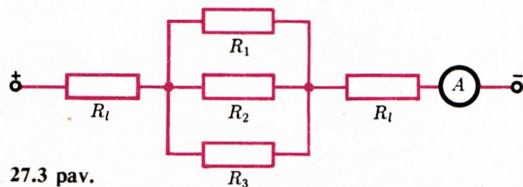
(27.6) lygybėje įrašykime srovės stiprumo išraiškas iš Omo dėsnio:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}.$$

Padalinę iš U gauname:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \qquad (27.7)$$

arba



27.3 pav.

$$g = g_1 + g_2 + g_3. \qquad (27.8)$$

Lygiagrečiai sujungtos grandinės laidumas yra lygus atskirų šakų laidumų sumai.

Jeigu visų šakų varžos vienodos, $R_1 = R_2 = ... = R_n$, tai iš (27.7) gauname $\frac{1}{R} = \frac{n}{R_1}$ arba

$$R = \frac{R_1}{n}. \qquad (27.9)$$

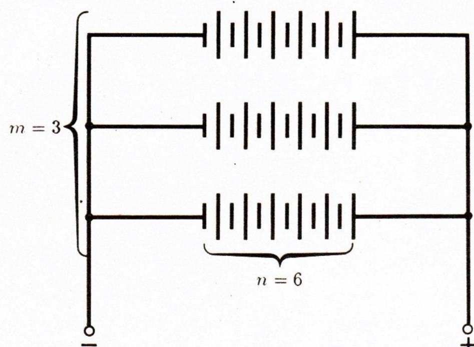
Lygiagrečiai jungiami į elektros tinklą praktiškai visi energijos imtuvai — elektros varikliai, apšvietimo lempos, buitiniai elektros prietaisai, nes jų darbui reikalinga pastovi tinklo įtampa. Lygiagrečiai sujungti imtuvai nepriklauso vienas nuo kito — išjungus vieną ar keletą imtuvų, kitose šakose įtampa praktiškai nepakinta.

▲ **27.2.** Kokią varžą ir kaip reikia prijungti prie 24 Ω varžos laidininko, norint gauti 20 Ω ekvivalentinę varžą?

Išnagrinėję nuoseklųjį ir lygiagretųjį imtuvų jungimą, įsitikinome, kad imtuvus jungiant nuosekliai pasiskirsto įtampa ir padidėja varža (srovės kelias pailgėja), o jungiant lygiagrečiai pasiskirsto srovė ir sumažėja varža (srovės kelias paplatėja). Praktikoje dažnai tenka derinti abu būdus. Tai — **mišrusis** grandinės dalių jungimas: kelios lygiagrečiai sujungtų imtuvų grupės tarpusavyje jungiamos nuosekliai. Būdingas mišraus jungimo pavyzdys — grupė lygiagrečiai sujungtų elektros imtuvų sujungti su šaltiniu perdavimo laidais, taip pat turinčiais varžą (27.3 pav.). Mišrios grandinės skaičiuojamos taikant nuoseklaus ir lygiagretaus jungimo taisykles.

§ 27.2. Elektros šaltinių jungimas į baterijas

Jeigu vieno šaltinio (galvaninio elemento, akumuliatoriaus) tiekiamos srovės arba įtampos imtuvui nepakanka, keli šaltiniai



27.4 pav.

sujungiami į bateriją bendram darbui. Elektros šaltiniai tarpusavyje jungiami tais pačiais būdais, kaip ir imtuvai.

Nuosekliai sujungta baterija

Tais atvejais, kai reikia padidinti įtampą, elementai jungiami nuosekliai, t. y. vieno elemento teigiamas gnybtas jungiamas su kito elemento neigiamu gnybtu. Baterijos iš n elementų EVJ E yra n kartų didesnė už vieno elemento EVJ E_1, t. y. $E = nE_1$. Tačiau n kartų padidėja ir baterijos vidinė varža: $r = nr_1$. Prijungus prie tokios baterijos išorinę grandinę, kurios varža R, srovės stiprumas, pagal Omo dėsnį, bus lygus

$$I = \frac{nE_1}{R + nr_1}. \qquad (27.10)$$

Lygiagrečiai sujungta baterija

Sujungus m elementų lygiagrečiai, t. y. vienavardžiais poliais, baterijos EVJ nepadidėja — lieka tokia, kaip vieno elemento, bet m kartų sumažėja baterijos vidinė varža: $r = r_1/m$. Grandinėje, kurioje įjungta tokia baterija, srovės stiprumas lygus

$$I = \frac{E_1}{R + r_1/m}. \qquad (27.11)$$

Mišriai sujungta baterija

Siekiant gauti reikiamą įtampą ir reikiamą srovę, dažnai derinami nuoseklusis ir lygiagretusis jungimo būdai — elementai į bateriją jungiami mišriai. Jeigu bateriją sudaro m lygiagrečių šakų, kurių kiekvienoje nuosekliai sujungta po n elementų (27.4 pav.), tai grandine tekančios srovės stiprumas

$$I = \frac{nE_1}{R + nr_1/m}. \qquad (27.12)$$

▲ **27.3.** 6 elementai, kurių kiekvieno evj 1,1 V ir vidinė varža 3,0 Ω, sujungti nuosekliai po du į tris lygiagrečias grupes. Kokio stiprumo srovė teka išorine grandine, kurios varža 2,0 Ω?

? *1. Sugalvokite schemą lemputei įjungti iš dviejų vietų.*
2. Nuosekliai sujungtoje grandinėje srovės stiprumas visur vienodas. Kodėl nevienodas elektronų dreifo greitis?
3. Kodėl lygiagrečiai sujungtų rezistorių bendra varža mažesnė už kiekvieno jų varžą?
4. Kodėl, jungiant galvaninius elementus lygiagrečiai, baterijos evj nedidėja?

27.4. Sujungus 2 laidininkus nuosekliai, jų ekvivalentinė varža lygi 27 Ω, o sujungus lygiagrečiai,— 6 Ω. Apskaičiuokite, kokia kiekvieno laidininko varža.

27.5. Iš vielos padarytas kubo formos karkasas, kurio briaunos varža lygi 6 Ω. Kokia yra įtampa tarp diametraliai priešingų kubo viršūnių, jei prie jų prijungtais laidais teka 2 A srovė? Kokia kubo varža?
Pakartokite § 22.2.

28 paskaita

ELEKTRA ŽMOGAUS TARNYBOJE

Svarbiausios žinios apie elektros srovės darbą, galią ir šiluminį veikimą buvo pateiktos pirmajame fizikos kurse. Dabar jas pakartosime. Tų žinių ir jų taikymo įgū-

džių reikės ne tik tolesniam fizikos kursui mokytis, be jų nesugebėsite teisingai naudotis elektra darbe ir buityje.

§ 28.1. Elektros srovės darbas

Elektros energija, kurią suteikia krūviams srovės šaltinis, išorinėje grandinės dalyje virsta kitų rūšių energija: elektros varikliuose — mechanine, šildymo prietaisuose — šilumine, apšvietimo lempose — šilumine ir šviesos energija, įkraunamuose akumuliatoriuose — chemine energija. *Elektros energijos kiekis, kuris išorinėje grandinės dalyje virsta kitų rūšių energija, yra lygus elektros srovės darbui.*

§ 22.2 jau esame nagrinėję elektrinių jėgų darbą judant krūviui elektriniame lauke. Šis darbas išreiškiamas pratekėjusio krūvio q ir įtampos U sandauga: $A = qU$ (22.4). Prisiminę, kad, tekant stiprumo I srovei, per laiką t praeina krūvis $q = It$ (25.1), gauname formulę elektros srovės darbui skaičiuoti:

$$A = IUt. \qquad (28.1)$$

Taigi, norint elektros srovės darbą nustatyti bandymu, reikia naudotis ampermetro, voltmetro ir laikrodžio parodymais. Gaminami ir specialūs prietaisai srovės darbui matuoti — elektros energijos skaitikliai.

(28.1) formulė universali: ją taikant apskaičiuojamas *visas* elektros srovės darbas nepriklausomai nuo to, kokios rūšies energija virto grandinėje elektros energija — šilumine, mechanine ar chemine.

Taikydami Omo dėsnį, (28.1) formulėje galime srovę arba įtampą pakeisti kitais dydžiais. Gausime dar dvi ekvivalenčias darbo formules:

$$A = \frac{U^2 t}{R}, \qquad (28.2)$$

$$A = I^2 R t. \qquad (28.3)$$

Dvi pastarosios formulės taikomos tada, kai žinoma energijos imtuvo varža R ir jo įtampa (28.2) arba juo tekanti srovė (28.3). Tačiau dėl varžos sudaromo pasipriešinimo srovei elektros energija virsta tik vidine (šilumine) energija, kaip ir mechanikoje dėl trinties kinetinė energija virsta vidine. Taigi pagal (28.2) ir (28.3) formules apskaičiuojame tik tą elektros energijos dalį, kuri varžos R imtuve virto šilumine energija Q: $A = Q$. Jeigu imtuvas yra šiluminis prietaisas, tas darbas A bus *visas* elektros energijos sąskaita atliktas darbas. O jeigu negrinėjamasis imtuvas — elektros variklis ar įkraunamas akumuliatorius, tai pagal (28.2) ar (28.3) formules rasime tik elektros energijos *dalį*, eikvojamą variklio ar akumuliatoriaus laidininkams šildyti. Tai bus tik šiluminiai nuostoliai. Beje, šiuo atžvilgiu ypač „pavojinga" (28.2) formulė: jeigu elektros energija virsta kelių rūšių energija, bendra imtuvo įtampa U pasiskirsto tarp tų virsmų.

Simas Klaidelė sprendė uždavinį: **28.1.** Elektros variklis, kurio apvijos varža 0,40 Ω, ima iš 300 V įtampos tinklo 50 A srovę. Reikia apskaičiuoti energiją, suvartotą per 5 h.
Variklio suvartotą energiją Simas apskaičiavo trim būdais:

$$A = IUt = 50\ \text{A} \cdot 300\ \text{V} \cdot 18\,000\ \text{s} = 270 \cdot 10^6\ \text{J};$$

$$A = I^2 R t = (50\ \text{A})^2 \cdot 0{,}4\ \Omega \cdot 18\,000\ \text{s} = 18 \cdot 10^6\ \text{J};$$

$$A = \frac{U^2 t}{R} = \frac{(300\ \text{V})^2 \cdot 18\,000\ \text{s}}{0{,}4} = 405 \cdot 10^7\ \text{J}.$$

Kodėl atsakymai skirtingi? Kuris iš jų teisingas?

Džaulio dėsnis

Pagal (28.3) formulę *šilumos kiekis, išsiskiriantis laidininke, kai juo teka srovė, yra proporcingas srovės stiprumo kvadratui, laidininko varžai ir srovės tekėjimo laikui:*

$$Q = I^2 R t. \qquad (28.4)$$

Tai 1841 m. nustatė Džeimsas Džaulis.

▲ **28.2.** Kiek šilumos išsiskyrė 6,0 Ω varžos reostate per 5,0 min, jei per tą laiką juo pratekėjo 600 C elektros?

§ 28.2. Elektros srovės galia

Kiekvienas gamykloje pagamintas elektros prietaisas turi techninį pasą, kuriame nurodyta jo **galia**. Pirkdami paprasčiausią elektros lemputę, mes ją apžiūrime ir randame užrašytą galią. Iš jos sprendžiame, kaip lemputė švies ir kiek kainuos jos naudojimas.

Galia (P), kaip ir mechanikoje, išreiškiama atlikto darbo A ir laiko t, per kurį jis atliktas, santykiu:

$$P = \frac{A}{t}. \qquad (28.5)$$

Taigi elektros srovės galia, kaip ir mechaninė, apibūdina darbo atlikimo greitį. Galios SI vienetas yra **vatas** (W). Remiantis (28.5), $1\ W = 1\ J/1\ s$. Vadinasi, vatas yra galia tokio elektros imtuvo, kuriame kiekvieną sekundę 1 J elektros energijos virsta kitos rūšies energija. Praktikoje vartojami ir kartotiniai vato vienetai: $10^2\ W = 1\ hW$; $10^3\ W = 1\ kW$; $10^6\ W = 1\ MW$.

Į galios formulę (28.5) įrašę darbo išraiškas (28.1), (28.2) ir (28.3), gausime atitinkamas galios formules:

$$P = IU, \qquad (28.6)$$

$$P = \frac{U^2}{R}, \qquad (28.7)$$

$$P = I^2R. \qquad (28.8)$$

Elektros srovės galią galima išmatuoti naudojantis ampermetru ir voltmetru arba specialiu prietaisu *vatmetru*.

Praktiškas darbo vienetas

Žinant prietaiso galią P, lengva apskaičiuoti per laiką t jo atliktą darbą (suvartotą energiją):

$$A = Pt. \qquad (28.9)$$

Galią matuojant kilovatais, o laiką valandomis, darbas išreiškiamas praktikoje plačiai vartojamais vienetais **kilovatvalandėmis** (kW · h):

$$1\ kW \cdot h = 1000\ W \cdot 3600\ s = 3\ 600\ 000\ J = 3{,}6\ MJ.$$

▲ **28.3.** Kiek elektros energijos suvartoja per mėnesį 600 W galios elektrinis kaitinimo prietaisas, jeigu jis būna įjungtas vidutiniškai po 3 h per parą?

§ 28.3. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai

Raktas daugeliui uždavinių

Daugelyje uždavinių aprašomos įvairios situacijos, kai elektros energijos (A_{el}) sąskaita atliekamas mechaninis darbas A_{mech} arba laidininkai įšyla — išsiskiria šilumos kiekis Q. Neišvengiamus tokiais atvejais nuostolius rodo naudingumo koeficientas η.

Visų šio tipo uždavinių sprendimas prasideda tos pačios fizikinės prasmės atskleidimu: „Šiame uždavinyje aprašytoje situacijoje elektros energija virsta keliamojo krano (lifto, elektrovežio ir t. t.) mechaniniu darbu: $A_{el} = A_{mech}$. Atsižvelgdami į nurodytus nuostolius, galime parašyti:

$$\eta A_{el} = A_{mech}. \qquad (28.10)$$

Tai — pagrindinė **energijos balanso lygtis**, raktas visiems šio tipo uždaviniams spręsti. Elektros energija ir mechaninis darbas apskaičiuojamas savo ruožtu analizuojant situaciją ir naudojant atitinkamus sąryšius (žr. (28.1), (28.2), (28.3) formules, darbo ir jėgos išraiškas iš mechanikos kurso).

Kartais, žiūrint uždavinio sąlygos, vietoje energijos balanso paprasčiau sudaryti **galios balansą**:

$$\eta P = N; \quad (28.11)$$

čia P — vartojama elektros srovės galia, N — mechanizmo, mašinos naudingoji galia.

Analogiškai sprendžiami ir uždaviniai, kuriuose aprašomas elektros energijos virtimas vidine energija (šiluma Q). Balanso lygtis šiuo atveju:

$$\eta A_{el} = Q. \quad (28.12)$$

Gautas šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal aprašomajam šiluminiam procesui (kaitinimui, garinimui ir kt.) taikytinas formules, pavyzdžiui, (8.2), (12.1), (19.1).

Pavyzdys. Elektrovežį varo 8 traukos varikliai, sujungti po du nuosekliai. Jų n. k. 92%. Kontaktinio tinklo įtampa 3000 V, ir kiekvienu varikliu teka 380 A srovė. Kokia yra vidutinė traukos jėga, elektriniam traukiniui važiuojant vidutiniu 54 km/h greičiu?

S p r e n d i m a s. Nubraižome elektros grandinės schemą (28.1 pav.).

1. Šiuo atveju elektros srovės galia virsta elektrovežio mechanine galia. Sudarome galios balansą:

$\eta P = N$;

čia $P = IU$, o mechaninė galia $N = Fv$.

Įrašę išraiškas gauname: $\eta IU = Fv$;

iš čia ieškomasis dydis — elektrovežio traukos jėga —

$$F = \frac{\eta IU}{v}. \quad (28.13)$$

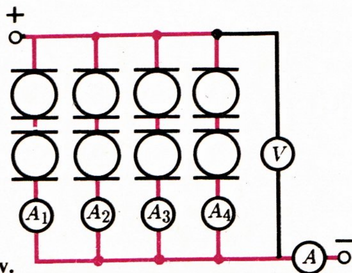
2. Randame sąlygoje duomenis:

$\eta = 92\% = 0{,}92$,

$U = 3000$ V,

$v = 54$ km/h $= 15$ m/s.

$I = 4 \times 380$ A $= 1520$ A (srovė teka 4 lygiagrečiomis šakomis).



28.1 pav.

3. Įrašome duomenis į (28.2) ir apskaičiuojame:

$$F = \frac{0{,}92 \cdot 1520 \cdot 3000}{15} \text{ N} = 279\,680 \text{ N}.$$

Ats. $F = 280$ kN.

▲ **28.4.** Tramvajaus vagonų elektros varikliai ima 112 A srovę iš 550 V įtampos tinklo. Kokiu greičiu važiuoja tramvajus, jeigu varikliai vysto 3600 N traukos jėgą, o jų n. k. 70%?

? *1. Kai laidininkai sujungti nuosekliai, daugiau šilumos išsiskiria tame, kurio varža didesnė, o kai sujungti lygiagrečiai,— atvirkščiai. Kodėl taip yra?*

2. $Q = I^2Rt$ ir $Q = \frac{U^2t}{R}$ teisingos formulės šilumos kiekiui skaičiuoti. Tačiau pagal vieną iš jų laidininke išsiskyręs šilumos kiekis tiesiog proporcingas varžai, o pagal kitą — atvirkščiai. Kaip yra iš tikrųjų?

■ **28.5.** Elektrovežis važiuoja pastoviu 43,2 km/h greičiu, vystydamas vidutinę 43,7 kN traukos jėgą. Kokio stiprumo srovė teka elektrovežio varikliu, jeigu kolektoriaus įtampa lygi 1500 V, o variklio n. k. 92%?

■ **28.6.** Į 46 g masės aliumininį kalorimetrą įpilta 180 g vandens ir įleista 2,0 Ω varžos spiralė, prijungta prie 4,8 V įtampos šaltinio. Keliais laipsniais įšils vanduo per 5 min? Energijos nuostolių nepaisykite.

29 paskaita

TERMOELEKTRINIAI REIŠKINIAI

§ 29.1. Termosrovė

Gerai žinome, kad elektros energija gali virsti šiluma. O ar galimas atvirkščias reiškinys — ar gali šiluminė energija tiesiogiai virsti elektros energija?

Zėbeko efektas

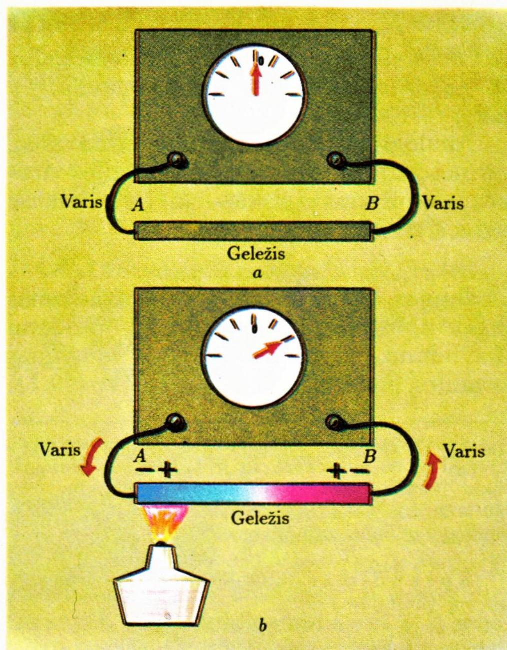
Sudarykime uždarą grandinę iš geležinio ir varinio laidininkų (be srovės šaltinio!) ir įjun-

kime į ją jautrų galvanometrą (29.1 pav., *a*). Kaip ir tikėjomės, galvanometras srovės tekėjimo grandinėje nerodys. Tačiau palietus vieną geležies ir vario kontaktą (*A*) ranka, galvanometro rodyklė nukrypsta! Paėmus ranka kitą kontaktą (*B*), galvanometro rodyklė nukrypsta į priešingą pusę. Jeigu galvanometras „tyli“, tai ne todėl, kad visai neatsiranda srovė, o todėl, kad galvanometras nepakankamai jautrus. Padėtį galima ištaisyti stipriau šildant kontaktą, pavyzdžiui, spiritinės lempelės liepsna — tada net „vangiausias“ galvanometras parodys, kad juo teka srovė (29.1 pav., *b*). Srovė, atsiradusi šiluminei energijai tiesiogiai virstant elektros energija, vadinama **termosrove**, o du sujungti skirtingų medžiagų laidininkai vadinami **termoelementu**. Laidininkai, sudarantys termoelementą, vadinami **termoelektrodais**.

Aprašytąjį reiškinį atrado 1821 m. vokiečių fizikas Tomas Z ė b e k a s (1770—1831).

Kaip atsiranda termosrovė

Skirtinguose metaluose yra nevienoda laisvųjų elektronų koncentracija, nevienodos jėgos sulaiko elektronus uždarytus metale. Todėl metalų kontakto vietoje prasideda laisvųjų elektronų (elektroninių dujų) difuzija. Suglaudus geležį ir varį, iš geležies į varį prasiskverbs daugiau elektronų, negu priešinga kryptimi, nes geležyje jų koncentracija didesnė. Geležis praras dalį elektronų, o varyje atsiras jų perteklius — metalų sandūra įsielektrins. Susidarys **kontaktinis potencialų skirtumas**, tarsi įkrautame labaiploname plokščiame kondensatoriuje ($d = 10^{-9}$—10^{-10} m). Tarp įsielektrinusių paviršių veiks **kontaktinis elektrinis laukas**, kuris stabdys tolesnį elektronų judėjimą iš geležies į varį ir skatins priešingą srautą. Kontaktiniam potencialų skirtumui pasiekus tam tikrą vertę, nusistovės *dinaminė pusiausvyra*: kiek elektronų difunduos per sekundę iš geležies į varį, tiek pat, traukiami lauko, pereis per tą patį laiką atvirkščia kryptimi. Tarp metalų bus pastovus potencialų skirtumas.



29.1 pav.

Jeigu abiejų geležies ir vario kontaktų *A* ir *B* temperatūra vienoda, kontaktiniai potencialų skirtumai negali sukurti grandinėje srovės, nes kontaktuose *A* ir *B* jie yra vienodo dydžio, bet priešingų krypčių, taigi elektriniai laukai vienas kitą kompensuoja. Tačiau vieną kontaktą pašildžius elektronų difuzija jame paspartės ir susidarys didesnis kontaktinis potencialų skirtumas negu kitame žemesnės temperatūros kontakte. Atstojamojo elektrinio lauko stiprumas jau nebus lygus nuliui — atsiras **kontaktinė termoelektrovaros jėga** ir grandine *AB* tekės srovė (29.1 pav., *b*). Ji labai silpna, bet stiprėja didėjant kontaktų *A* ir *B* temperatūros skirtumui:

$$E = \alpha\Delta t; \qquad (29.1)$$

čia α — proporcingumo koeficientas, priklausantis nuo metalo rūšies, o $\Delta t = t_A - t_B$ — šiltojo ir šaltojo kontaktų temperatūros skirtumas.

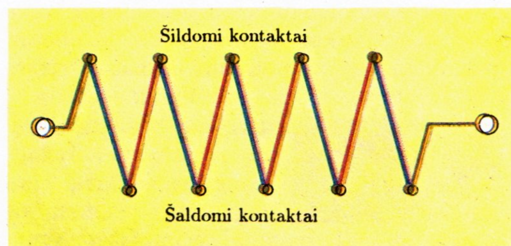
§ 29.2. Termoelementai ir jų naudojimas

Nors termoelektrovaros jėgos ir nedidelės (vos keletas tūkstantųjų volto dalių, esant temperatūros skirtumui 100 K), bet šiuolaikiniais prietaisais jau tiksliai išmatuojamos. Todėl termoelementus galima panaudoti temperatūrai matuoti, prijungus galvanometrą ir jo skalę sugradavus laipsniais.

Termoelementais, kurių elektrodai pagaminti iš sunkiai besilydančių metalų, galima matuoti labai aukštas temperatūras aukštakrosnėse, šiluminių elektrinių garo įrenginiuose, gamyklose ir mokslinėse laboratorijose. Ne vien matuoti, bet ir automatiškai ją reguliuoti, nes termoelemento elektrinį signalą nesunku sustiprinti ir panaudoti reikiamos aparatūros valdymui.

Be to, termoelementais galima matuoti labai žemas temperatūras, kuriose visi skysčiai užšąla.

Nuosekliai sujungus n termoelementų gaunama **termobaterija** (29.2 pav.), kurios jautrumas n kartų didesnis negu vieno elemento. Termobaterija kartu su jautriu galvanometru įgalina išmatuoti milijonąsias laipsnio dalis! Tai reiškia, kad galima aptikti degančios žvakės šilumą už kelių kilometrų, nustatyti žvaigždės šviesos intensyvumą arba temperatūrų skirtumą Mėnulio atvaizde tarp apšviesto ploto ir šešėlio! Jautrios termobaterijos įtaisomos *termopelengatoriuose* — aparatuose, skirtuose iš nuotolio (daugiausia iš lėktuvo) šilumą skleidžiantiems objektams aptikti.



29.2 pav.

Termoelementus galima pagaminti mikroskopinio dydžio ir matuoti temperatūrų skirtumą tarp labai artimų taškų. Tokio termoelemento šiluminis laidumas labai mažas, todėl nekeičia matuojamojo objekto temperatūros.

Deja, metalinių termoelementų naudingumo koeficientas labai mažas, vos 0,1—0,5%, tačiau puslaidininkinių jau siekia 15%, todėl juos galima jungti į baterijas ir naudoti kaip šiluminius elektros srovės generatorius — **termogeneratorius.**

Termoelektriniai generatoriai kosmose

Pagal šilumos šaltinį termogeneratoriai skirstomi į saulės, atominius ir dujinius, o pagal paskirtį — į kosminius, jūrinius ir kt. Termogeneratoriai neturi judamųjų dalių, labai patikimi, paprasti aptarnauti. Jų galia siekia iki kelių šimtų kilovatų. Termogeneratorių elektros energiją vartoja automatiniai švyturiai, retransliatoriai, dirbtiniai Žemės palydovai ir kiti kosminiai aparatai.

§ 29.3. Peltjė efektas

1834 m. prancūzų fizikas Žanas Peltjė (1785—1845) pastebėjo, kad egzistuoja reiškinys, atvirkščias termosrovės atsiradimui: leidžiant srovę termoelementu, vienas jo kontaktas kaista, o kitas aušta. Pakeitus srovės kryptį, kontaktuose vyksta priešingi procesai. Šis reiškinys buvo pavadintas **Peltjė efektu.**

Kaip elektroninė teorija aiškina Peltjė efektą

Jeigu šaltinio srovę nukreipsime ta pačia kryptimi, kaip tekėjo termosrovė (29.1 pav., *b*, prieš laikrodžio rodyklę), tai kontakte *A* elektronų srautas bus stabdomas, nes turės nugalėti kontaktinį potencialų skirtumą; elektronų greitis ir kinetinė energija mažės, ir dėl to kontaktas *A* pradės aušti. Kontakte *B* vyks priešingi reiškiniai — jis šils.

Ateities aparatai

Vykstant Peltjė efektui puslaidininkiniuose termoelementuose, galima pasiekti apie 70 K temperatūros skirtumą. Tokie termoelementai gali būti naudojami šaldytuvuose. Paleidus termobaterija srovę, šaldytuvo viduje esantieji kontaktai šąla, o esantieji išorėje — šyla. Pakeitus elektros srovės kryptį, šaldytuvas virsta šildytuvu.

Pagaminus didelio ploto termobaterijas, jomis būtų galima šildyti arba vėsinti patalpas.

? *1. Ar didelę termoelektrovaros jėgą sudarys termoelementas, abu kontaktus įkaitinus iki 300 °C?*

29.1. Elektriniame virdulyje 1,8 l vandens įkaista nuo 10 iki 100 °C per 22,5 min. Apskaičiuokite virdulio kaitinamojo elemento varžą. Virdulys įjungiamas į 120 V įtampos tinklą, o jo n. k. 80%. Kokia srovė teka kaitinamuoju elementu?

29.2. Kokią didžiausią traukos jėgą išvysto dyzelinis elektrotraktorius judėdamas 2,0 km/h greičiu, jeigu jo elektros variklis vartoja 360 A srovę, jo gnybtų įtampa lygi 470 V, o n. k. 72%?

2.3 skyrius
ELEKTROS SROVĖ SKYSČIUOSE

30 paskaita
FIZIKINĖ CHEMIJA

„Pati nuostabiausia išvada iš Faradėjaus dėsnio yra ta, kad elektra, tiek teigiama, tiek ir neigiama, yra sudaryta iš elementarių porcijų, kurias galima pavadinti „elektros atomais“.

Vokiečių fizikas
Hermanas Helmholcas (1821—1894)

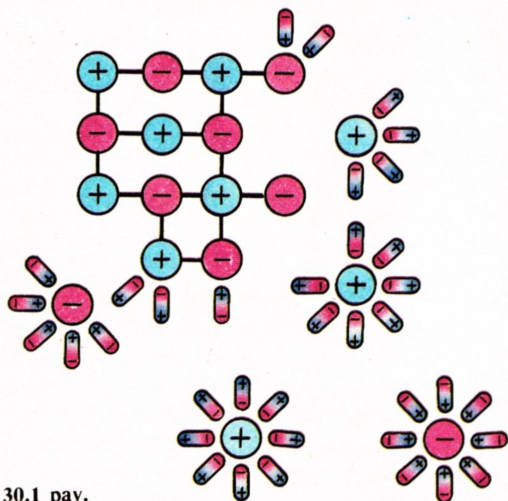
§ 30.1. Elektrolitų laidumas

Dvi laidininkų rūšys

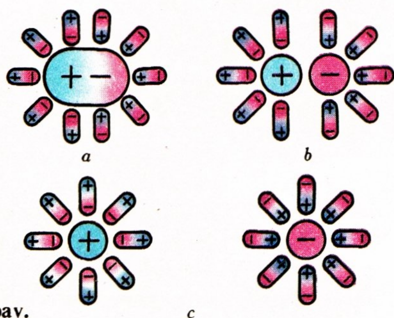
Metalais, jų lydiniais, anglimi elektros srovė teka visiškai nekeisdama jų cheminės sudėties. Tekant srovei, jie tik įšyla. Tokios medžiagos vadinamos **pirmosios rūšies laidininkais.** Joms būdingas **elektroninis laidumas. Antrosios rūšies laidininkai** — rūgščių, bazių ir druskų tirpalai bei daugelis išlydytų kietų dielektrikų (pvz., druska, molis) tekant srovei ne tik įšyla, bet ir chemiškai skyla į sudėtines dalis. Todėl procesais, vykstančiais antrosios rūšies laidininkuose, domisi ir fizikai, ir chemikai. Susikūrė tarpinė mokslo šaka **fizikinė chemija**, kuri, remdamasi fizikos dėsniais, tiria ir cheminius reiškinius, vykstančius antrosios rūšies laidininkuose.

Elektrolitinė disociacija

Rūgščių, bazių ir druskų tirpalų bei lydalų laidumas elektrai jau nagrinėtas chemijos kurse, todėl tik trumpai priminsime svarbiausius teiginius:



30.1 pav.



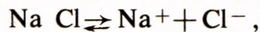
30.2 pav.

1. Medžiagos, kurios ištirpintos arba išlydytos praleidžia elektros srovę, vadinamos **elektrolitais.**

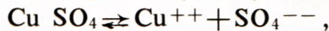
2. Elektrolitui tirpstant vandenyje, molekulės suyra į teigiamą ir neigiamą elektros krūvį turinčias dalis, vadinamas **jonais.** Elektrolito molekulių skilimas į jonus, veikiant tirpikliui, vadinamas **elektrolitine disociacija.**

3. Skirtingų ženklų jonai gali susijungti ir vėl sudaryti neutralią molekulę. Šis priešingas disociacijai procesas vadinamas **molizacija**, arba **jonų rekombinacija.**

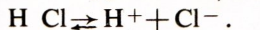
Disociacijos ir molizacijos procesai užrašomi lygtimis, pavyzdžiui:



$NaCl \rightleftarrows Na^{+} + Cl^{-}$,



$CuSO_4 \rightleftarrows Cu^{++} + SO_4^{--}$,



$HCl \rightleftarrows H^{+} + Cl^{-}$.

Kaip suyra molekulės

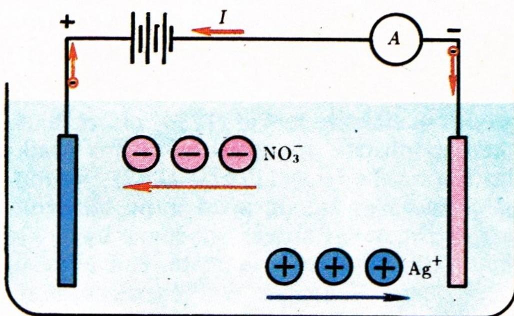
Elektrolitų disociacija vandenyje vyksta todėl, kad vandens molekulės turi didelį dipolinį momentą (§ 23.2). Dėl to apie jas yra stiprus elektrinis laukas, stipresnis negu tarp pačių elektrolito jonų. Jonai atplėšiami nuo kristalo (30.1 pav.) arba vienas nuo kito (30.2 pav.) ir difunduoja vandenyje. Šiam procesui padeda ir šiluminis molekulių judėjimas.

§ 30.2. Elektrolizė

„Konvekcija“ elektrolituose

Nesant išorinio elektrinio lauko, tirpalo jonai ir molekulės juda chaotiškai. Atsiradus tirpale elektriniam laukui, atsiranda ir kryptingas jonų judėjimas: teigiami jonai juda link neigiamo elektrodo, vadinamo **katodu**, o neigiami jonai — link teigiamo elektrodo, vadinamo **anodu.**

Šie du priešingi jonų srautai ir sudaro



30.3 pav.

elektros srovę elektrolituose (30.3 pav.). Taigi antrosios rūšies laidininkų, t. y. *elektrolitų laidumas yra joninis*.

Elektrolitu tekančiai srovei galioja Omo dėsnis.

Dvejopi elektrolizės procesai

Srovės tekėjimas elektrolituose susijęs su medžiagos pernešimu. Pasiekę elektrodus, jonai atiduoda elektronų perteklių arba prisijungia trūkstamus elektronus ir virsta neutraliais atomais arba molekulėmis. *Medžiagos išsiskyrimas ant elektrodų, tekant srovei elektrolitu, vadinamas elektrolize*. Elektrolizės metu patys elektrodai gali reaguoti arba nereaguoti su elektrolitu. Platinos, grafito arba anglies elektrodai inertiški, nereaguoja su tirpalu, ir prie abiejų elektrodų išsiskiria medžiaga (pvz., vykstant HCl elektrolizei, vandenilio ir chloro dujos). Šiuo būdu gaunamas iš junginių vandenilis, deguonis, chloras, natris, aliuminis, sintetinami įvairūs cheminiai junginiai farmacijai, parfumerijai ir kt. Elektrocheminis medžiagų gavimo būdas paprastas, o gaunamos medžiagos labai grynos.

Kai elektrodai padaryti iš to paties metalo, kurio jonų yra elektrolite, anodas elektrolizės metu tirpsta — metalas pereina į elektrolitą, o ant katodo jis nusėda iš elektrolito. Tai patogus būdas priemaišoms išvalyti iš vario, sidabro ir kitų metalų.

Faradėjaus dėsnis elektrolizei

Kiekybinius santykius tarp perėjusio per elektrolitą elektros krūvio ir išsiskyrusių ant elektrodų medžiagų kiekio 1834 m. eksperimentais nustatė anglų mokslininkas Maiklas F a r a d ė j u s (1791—1867). Kruopščiai pasvėręs katodą prieš ir po elektrolizės ir išmatavęs srovės stiprumą bei tekėjimo laiką, Faradėjus nustatė, kad *elektrolizės metu išsiskyrusios medžiagos masė yra tiesiog proporcinga srovės stiprumui ir jos tekėjimo laikui*:

$$m = kIt, \qquad (30.1)$$

arba, turint omenyje, kad $q = It$,

$$m = kq. \qquad (30.2)$$

Proporcingumo koeficientas k šiose formulėse vadinamas išskirtosios **medžiagos elektrocheminiu ekvivalentu**. Jis priklauso nuo jonų masės ir valentingumo. k matavimo SI vienetas yra 1 kg/C. Dažniausiai vartojamų medžiagų elektrocheminiai ekvivalentai surašyti XVI lentelėje.

Dabar, kai mokslas yra išaiškinęs, kaip vyksta elektrolizė, lengva paaiškinti ir Faradėjaus dėsnį. Visi vienos rūšies jonai yra vienodos masės ir perneša vienodą krūvį. Vadinasi, kuo didesnis pratekėjęs elektrolitu krūvis, tuo daugiau jonų neutralizavosi prie elektrodų ir tuo didesnė bendra jų masė.

▲ **30.1.** Leidžiant elektrolitu 1,5 A srovę, per 5 min ant katodo išsiskyrė 137 mg medžiagos. Kokia tai medžiaga?

Elektros „atomų“ atradimas

Darant elektrolizės bandymus su įvairiomis druskomis, paaiškėjo štai kas: kad išsiskirtų vienas molis bet kokios vienvalentės medžiagos, reikia praleisti pro elektrolitą vieną ir tą patį elektros kiekį — $9{,}65 \cdot 10^4$ C! Šis dydis vadinamas **Faradėjaus skaičiumi** ir žymimas raide F:

$$F = 9{,}65 \cdot 10^4 \text{ C/mol}. \qquad (30.3)$$

Kita vertus, bet kokios medžiagos molyje yra vienas ir tas pats atomų arba jonų skaičius $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ mol^{-1} (Avogadro skaičius, žr. § 4.3). Žinodami, kokį krūvį pernešė visi vienvalenčiai jonai, galime rasti vienvalenčio jono krūvį e:

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{9{,}65 \cdot 10^4}{6{,}023 \cdot 10^{23}} = 1{,}60 \cdot 10^{-19} \text{C}. \qquad (30.4)$$

Rastasis minimalus jono krūvis pasirodė esąs tokio pat didumo, kaip elektrono krūvis, apskaičiuotas kitais metodais. Šis sutapimas patvirtino, kad *egzistuoja minimalus elektros krūvis.* Visi elektros krūviai yra šio krūvio kartotiniai.

Elektrochemijos pradininkas iš Gedučių

Elektrolitinės disociacijos ir elektrolizės teoriją pirmasis sukūrė ir 1805 m. paskelbė Teodoras G r o t u s (1785—1822), ilgą laiką gyvenęs ir dirbęs Gedučiuose (Pakruojo rajonas). T. Grotus įvedė terminus: „teigiamas polius", „neigiamas polius", įrodė, kad molekulės yra dipoliai ir poliarizuojasi. T. Grotus buvo vienas fizikinės chemijos mokslo pradininkų.

§ 30.3. Elektrolizės taikymas technikoje

Daugelyje įmonių veikia galvaniniai cechai, kuriuose geležinės ir plieninės detalės padengiamos elektrolizės būdu plonais nerūdijančių metalų (chromo, nikelio, cinko) sluoksniais. Tokiu pat būdu sidabruojami ir auksuojami papuošalai. Metalinių dangų nusodinimas ant gaminių vadinamas **galvanostegija.** Pastaruoju metu išrasti būdai nusodinti tokias dangas ir ant plastmasės paviršių.

Daug yra nuveikę šioje srityje ir Lietuvos mokslininkai, ypač per pokario dešimtmečius. Lietuvos Mokslų Akademijos Cheminės technologijos institutas Vilniuje yra vienas stambiausių pasaulyje metalų dangų sudarymo elektrolizės metodais tyrimo centrų.

Tikslių metalinių kopijų gamyba elektrolizės būdu vadinama **galvanoplastika**. Vaškinis arba gipsinis modelis padengiamas plonu grafito sluoksniu ir kaip katodas dedamas į elektrolito tirpalą, kur ant jo nusėda reikiamo storio metalo sluoksnis. Gaunama tiksli metalinė kopija. Galima metalą atskirti nuo modelio ir gautoje formoje lieti kopijas. Galvanoplastikos būdu gaminamos tipografinės klišės, patefono plokštelių matricos, skulptūrų ir bareljefų kopijos.

Galvanoplastiką išrado 1838 m. rusų fizikas B. J a k o b i s (1801—1874).

Apie elektrolizės pritaikymą metalurgijoje, chemijos ir farmacijos pramonėje jau buvo minėta § 30.2. Visa tai — tik pavyzdžiai, nes neįmanoma išvardyti visų šiuolaikinės technikos sričių, kuriose taikoma elektrolizė.

?

1. Elektrolite pilna elektringų dalelių. Kodėl apie jį nėra elektrinio lauko?
2. Pagrįskite teiginį, kad disociacija vyksta veikiant tirpikliui, o ne elektros srovei.
3. Kodėl disociacijos lygtyse rašomas ne lygybės ženklas, o dvi priešingos rodyklės?
4. Kurio metalo — vario ar sidabro — daugiau išsiskiria iš elektrolito pratekėjus vienodam elektros krūviui?

30.2. Matuodamas vario elektrocheminį ekvivalentą, moksleivis 5,00 min leido vario sulfato tirpalu 1,2 A srovę. Per tą laiką katodo masė padidėjo 120 mg. Kokią vario elektrocheminio ekvivalento vertę moksleivis gavo iš šio bandymo rezultatų? Palyginkite ją su lentelėje pateikta verte ir apskaičiuokite matavimo santykinę paklaidą.

30.3. Sidabruojant gaminį, iš sidabro druskos tirpalo, kurio varža 1,2 Ω, per 2 h išsiskyrė 40,32 g sidabro. Kokio stiprumo srovė tekėjo tirpalu, kokia buvo vonios gnybtų įtampa ir kiek energijos buvo suvartota sidabravimui?

2.4 skyrius

ELEKTROS SROVĖ DUJOSE IR VAKUUME

31 paskaita

KETVIRTOJI MEDŽIAGOS BŪSENA

„Iš visų reiškinių, kuriuos atskleidė pasauliui fizika, nėra gražesnio už praretintų dujų švytėjimą“.

Anglų fizikas Karlas Darou

§ 31.1. Dujų elektrinis laidumas

Dujos sudarytos iš elektriškai neutralių molekulių, ir normaliomis sąlygomis jos yra dielektrikai. Pakanka per milimetro dalį atitraukti vieną laidą nuo kito, kad liautųsi tekėjusi srovė. (Taip ir veikia elektros srovės jungikliai.)

Grandinę sujungia... žvakė

Sudarius grandinėje kelių centimetrų oro tarpą, elektros srovė netekės. Tačiau pakaitinus oro tarpą liepsna, galvanometro rodyklė nukrypsta! (31.1 pav.). Tai rodo, kad oro tarpe atsiranda elektringų dalelių — krūvininkų.

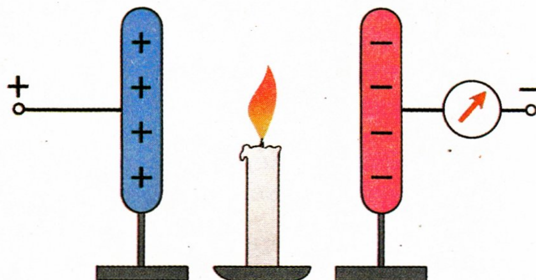
Kaip paaiškina srovę dujose elektroninė teorija? Aukštoje temperatūroje dujų molekulės įgyja tokią didelę energiją, kad susidurdamos išmuša elektronus — jonizuoja viena kitą. Netekusios elektronų molekulės tampa teigiamais jonais. Atskilę elektronai skrieja vieni arba prisijungia prie neutralių molekulių ir sudaro neigiamus jonus (31.2 pav.). Taigi *dujų elektrinis laidumas yra mišrus: joninis ir elektroninis.*

Dujas galima jonizuoti ir švitinant oro tarpą ultravioletiniais, Rentgeno arba radioaktyviųjų medžiagų skleidžiamais spinduliais.

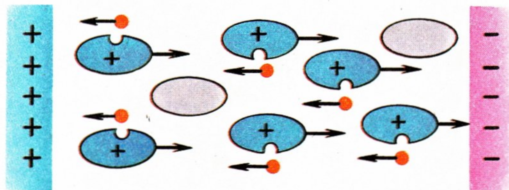
Srovę dujose priimta vadinti **išlydžiu.** Pasiekę elektrodus, dujų jonai netenka savo krūvio — virsta neutraliomis molekulėmis. Nei cheminės reakcijos, nei medžiagų išsiskyrimas ant elektrodų išlydžio metu nevyksta. Elektronas ir teigiamas jonas susidūrę gali vėl susijungti ir sudaryti neutralų atomą arba molekulę. Šis procesas vadinamas **molizacija**, arba **elektringųjų dalelių rekombinacija.** Nustojus veikti jonizatoriui, dujos greitai molizuojasi ir srovė nutrūksta. Toks išlydis, kuris vyksta tik veikiant pašaliniam jonizatoriui, vadinamas **nesavaiminiu.**

Kada nustoja galios Omo dėsnis?

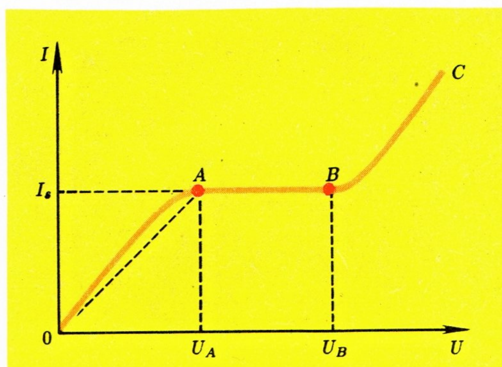
Srovės stiprumo priklausomybė nuo įtampos dujose gana sudėtinga. Kol įtampa tarp elektrodų maža, juos pasiekia tik nedidelė krūvininkų dalis, nes dauguma krū-



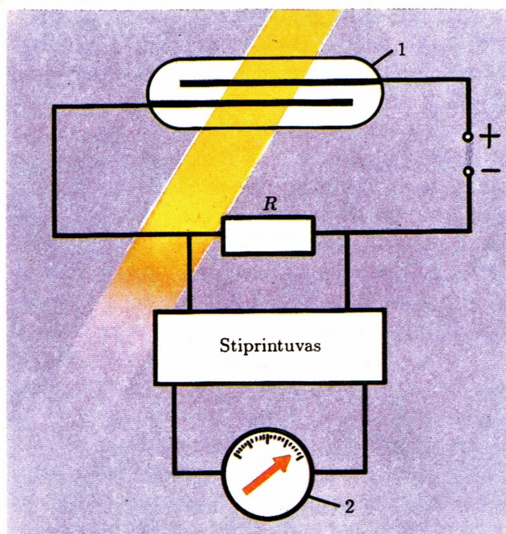
31.1 pav.



31.2 pav.



31.3 pav.



31.4 pav.

vininkų pakeliui rekombinuoja. Didinant įtampą, krūvininkų greitis didėja, vis daugiau jų pasiekia elektrodus ir srovės stiprumas didėja proporcingai įtampai (31.3 pav., grafiko dalis OA). Taigi iki įtampos U_A srovė dujose paklūsta Omo dėsniui. Kai įtampa, pasiekusi vertę U_A, ir toliau didėja, srovės stiprumas nebedidėja — lieka pastovus! Tai įvyksta todėl, kad jau visi jonizatoriaus sukurti krūvininkai pasiekia elektrodus ir paprasčiausiai nėra iš ko srovei didėti. Srovė, kurios stiprumas nepriklauso nuo įtampos, vadinama **soties srove** (31.3 pav., grafiko dalis AB, srovė I_S).

Kaip registruojamas radioaktyvusis spinduliavimas

Oro jonizacijos lygio matavimu pagrįstas radioaktyviojo spinduliavimo matuoklių **dozimetrų** veikimas. Dozimetras (31.4 pav.) sudarytas iš jonizacijos kameros (*1*), jautraus galvanometro (*2*), sugraduoto radiacijos vienetais, ir elektros šaltinio. Dozimetrai signalizuoja apie radioaktyvių medžiagų pasirodymą, jais tiriamas vietovės ir daiktų užterštumo laipsnis, užterštos teritorijos ribos. Jonizaciniai prietaisai, skirti pavienėms elektringoms dalelėms registruoti, vadinami **Geigerio skaitikliais** (§ 63.1).

§ 31.2. Savaiminiai išlydžiai dujose

Tęskime bandymą, kurio rezultatus vaizduoja 31.3 paveikslo grafikas.

Didinant įtampą tarp elektrodų nuo vertės U_A iki U_B, srovės stiprumas nekinta. Tačiau nuo tam tikros vertės — taško U_B — jis staiga smarkiai pašoka aukštyn (31.3 pav., grafiko dalis BC), nors jonizatoriaus galia ir nedidinama. Maža to, jonizatorių dabar galima ir visai pašalinti — srovė dujomis vis tiek tekės. Šio reiškinio, analogiško § 23.2 aprašytam izoliatoriaus pramušimui, priežastis yra vadinamoji **smūginė dujų jonizacija**.

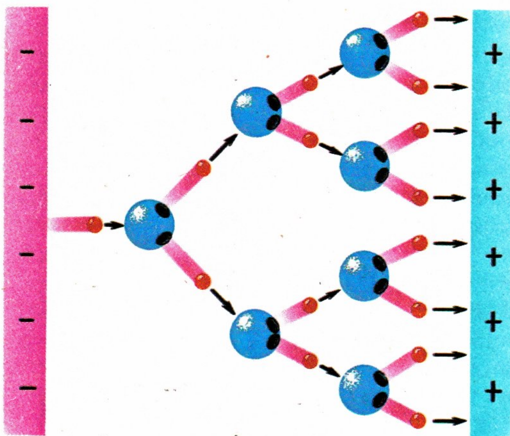
Kaip paaiškina smūginę jonizaciją elektroninė teorija? Stipriame elektriniame lauke elektringosios dalelės įgyja didelį greitį. Jų kinetinės energijos jau užtenka susidūrus jonizuoti neutralią molekulę — išmušti iš jos elektroną. Tai ir yra smūginė jonizacija.

Smūginė jonizacija gali prasidėti ir visai

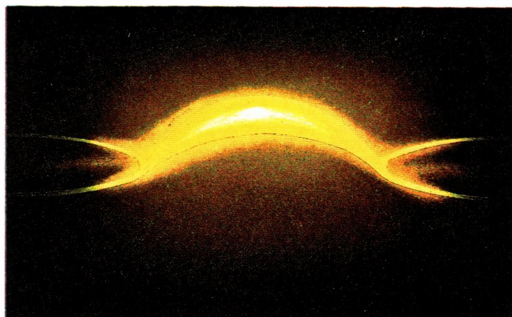
nesant pašalinio jonizatoriaus — savaime, nes dujose visuomet yra šiek tiek reikalingų jos pradžiai laisvųjų elektronų, o smūginei jonizacijai prasidėjus elektringų dalelių skaičius didėja tarsi sniego griūtis: kiekvienas naujai atsiradęs krūvininkas savo kelyje jonizuoja naujas molekules (31.5 pav.). *Išlydis dujose, vykstantis be jonizatoriaus, vadinamas* **savaiminiu.**

Savaiminio išlydžio atmainos

1. Kai elektrinio lauko stiprumas pasiekia maždaug 3 000 V/mm, oras staiga jonizuojasi ir tarp elektrodų nusidriekia akinamai šviečiantis laužytos formos kanalas arba gyslelių pluoštas — **kibirkštis.** Kibirkštinį išlydį lydi būdingas traškesys. Milžiniško kibirkštinio išlydžio pavyzdys yra žaibas (§ 23.1). Jonizuotų dujų temperatūra kibirkšties kanale siekia kelis tūkstančius laipsnių, o slėgis — šimtus atmosferų. Kontaktų kibirkščiavimas sudaro daug keblumų: kibirkštys lydo, ardo metalą, gadina jungiklius ir relių kontaktus. Tačiau kibirkštis gali būti ir naudinga. Elektros kibirkštimi pramušamos mikroskopinio dydžio skylutės stikle, plastmasėje ir kitose izoliacinėse medžiagose. Kibirkštimi galima „išgręžti" sudėtingo profilio angą kiečiausiame metale, kibirkštis uždega benzino garus vidaus degimo variklyje ir kt.



31.5 pav.



31.6 pav.

2. Nevienalyčiame elektriniame lauke smūginė jonizacija gali vykti ne visur, o tik ten, kur laukas stipriausias, ir be kibirkštinio išlydžio. Nutieskime nuo demonstracinio aukštos įtampos generatoriaus polių plonus lygiagrečius laidus, ir tamsoje pamatysime apie juos silpną švytėjimą — **vainikinį išlydį.** Švytintis vainikas apie laidus susidaro, dujoms jonizuojantis ne visoje erdvėje tarp laidų, o tik arti jų, kur laukas yra stipriausias (21.3 pav., *c*).

Dėl vainikinio išlydžio susidaro krūvio nutekėjimas nuo laidininkų smaigalių, nuo laidų aukštos įtampos tinkluose. Čia jis sudaro nemažus energijos nuostolius. Vainikinis išlydis panaudojamas elektrofiltruose (§ 20.5).

3. Labai svarbus praktikai savaiminis išlydis yra **elektros lankas** (Voltos lankas). Skirtingai nuo vainiko ir kibirkšties, elektros lankas užsidega veikiant neaukštai įtampai (40—50 V), tačiau srovės stiprumas turi būti didelis — dešimtys ir šimtai amperų. Norint gauti elektros lanką, reikia įtampą prijungti prie dviejų anglinių elektrodų, jų galus akimirkai suglausti, o paskui

atitraukti nedideliu atstumu vieną nuo kito. Elektrodai kontakto vietoje staiga įkaista, aukšta temperatūra jonizuoja orą, ir tarp anglių galų sušvinta akinanti šviesa — elektros lankas (31.6 pav.). Elektros lanko temperatūra siekia 4000 °C. Tokioje temperatūroje visos žinomos medžiagos lydosi ir virsta garais.

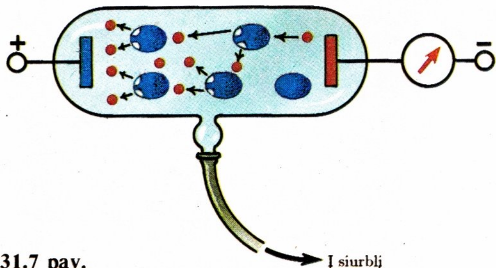
Elektros lankas naudojamas metalams lydyti, pjaustyti ir suvirinti. Tai — galingiausias šviesos šaltinis prožektoriams ir kino aparatams.

Elektros lanką 1802 m. išrado rusų mokslininkas Vasilijus Petrovas (1761—1834).

§ 31.3. Elektros srovė praretintose dujose

Jonizacija be jonizatoriaus

Stiklinį vamzdį su dviem įlydytais elektrodais sujunkime žarnele su vakuuminiu siurbliu, o prie elektrodų prijunkime įtampą nuo demonstracinio aukštos įtampos generatoriaus (31.7 pav.). Srovė dujomis netekės. Taip ir turi būti, nes generatoriaus įtampos pakaktų tik 3—4 cm oro tarpui pramušti kibirkštimi. Dabar įjunkime siurblį ir, siurbdami orą, atidžiai stebėkime vamzdį bei matavimo prietaisus. Likus vos tūkstantajai daliai buvusio (atmosferos) slėgio, galvanometro rodyklė staiga šokteli, parodydama, kad praretintu oru ėmė tekėti srovė! Galima apsieiti ir be galvanometro, nes, tekant srovei, dujos vamzdyje pradeda švytėti: pradžioje atsiranda bėgiojančios violetinės gijos, vėliau tarp elektrodų nusitiesia tamsiai raudonas stulpelis, kuris mažėjant slėgiui plečiasi, šviesėja ir palaipsniui užpildo visą vamzdį. Vamzdis gali būti išlankstytas, bet kokios formos — elektros išlydis eina per visus vingius. Šį išlydį vadiname **rusenančiuoju.**



31.7 pav.

Palaipsniui įleidžiant į vamzdį oro, galima stebėti procesą atvirkščia tvarka, kol dujų švytėjimas visiškai išnyksta.

Kaip gi jonizavosi dujos, jeigu jų neveikė joks žinomas jonizatorius?

Elektronus įgreitinti iki energijos, reikalingos dujų molekulėms jonizuoti, galima ne vien keliant įtampą: kuo ilgiau judės elektronas greitinančiame lauke iki susidurdamas su molekule, tuo daugiau spės įgyti energijos. Išsiurbiant orą, likus vamzdyje vos tūkstantajai daliai molekulių, tūkstantį kartų pailgėja elektrono kelias nuo vieno susidūrimo iki kito — laisvasis kelias. Taip įsibėgėję elektronai įgyja energiją, reikalingą molekulėms jonizuoti. Vamzdyje prasideda smūginė jonizacija.

Dujošvyčių vamzdelių era

Kiekvienos dujos praretintos švyti tik joms būdinga spalva: neonas — raudona, helis — geltona, vandenilis — mėlyna ir t. t. Raidžių ir ornamentų pavidalu išlankstyti įvairiom spalvom šviečiantys vamzdeliai naudojami iliuminacijoms, reklaminėms šviesoms, dekoratyviniams scenos efektams ir kt. Specialios konstrukcijos dujošvytės lempos naudojamos gatvių ir gamybinių patalpų apšvietimui.

§ 31.4. Plazma

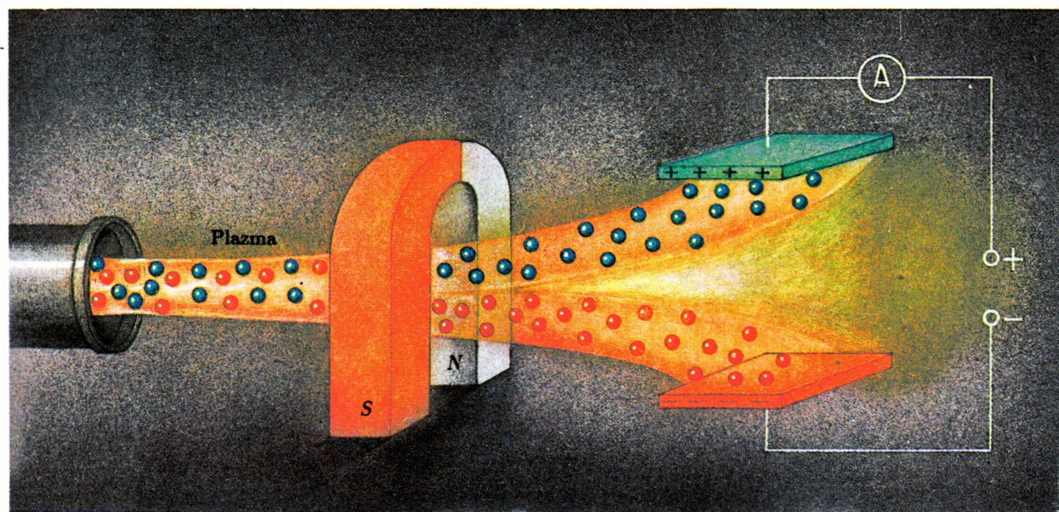
Ar liepsna — laidininkas?

Nuolat susiduriame su trimis įprastomis medžiagos agregatinėmis būsenomis: kieta, skysta ir dujine. Tyrinėdami išlydį dujose (kibirkštinį, vainikinį, lankinį ir rusenantįjį), susidūrėme su ketvirtąja medžiagos būsena — **plazma.** *Iš dalies arba visiškai jonizuotos dujos vadinamos plazma.* Plazma elektriškai neutrali, nes ją sudarančių teigiamų ir neigiamų krūvių koncentracija yra vienoda. 99,9% Visatos medžiagos yra plazmos pavidalo: Saulė, žvaigždės ir tarpžvaigždinės dujos sudarytos iš plazmos. Tik vieną dešimtąją dalį procento medžiagos Visatoje sudaro tokie kosminiai kūnai, kaip mūsų Žemė.

Plazma gali būti ir žemos temperatūros, jeigu dujas jonizuoja ne karštis, o kokios nors rūšies spinduliavimas. Saulės radiacijos jonizuoti viršutiniai atmosferos sluoksniai — žemos temperatūros plazma — supa mūsų planetą 100—300 km aukštyje. Tai vadinamoji **jonosfera.** Saulės vėjas (§ 38.2) sukelia jonosferoje įvairiaspalvį jonizuoto oro švytėjimą — šiaurės pašvaistes. Įvairiom spalvom plazma švyti dienos šviesos lempose ir reklaminių iškabų vamzdeliuose.

Ateities generatorius

Privertus plazmą dideliu greičiu skrieti tarp galingo magneto polių, joje esantys priešingų ženklų krūvininkai nukrypsta į priešingas puses (žr. § 38.1). Taip juos galima atskyrus kaupti elektroduose ir gauti EVJ. Elektrodus sujungus grandine tekės srovė (31.8 pav.). Toks yra **magnetinio plazmodinaminio** (MPD) generatoriaus veikimo principas. MPD generatorius degančio kuro energiją tiesiogiai verčia elektros energija. Pramoniniai MPD generatoriai dar tik kuriami ir bandomi, tačiau į juos energetikai deda dideles viltis, nes MPD generatoriai dvigubai ekonomiškiau naudoja kuro energiją negu šiuolaikinės šiluminės elektrinės.



31.8 pav.

? *1. Kodėl nevyksta rekombinacija dujose, tekant soties srovei?*
2. Kodėl, padidėjus atmosferos slėgiui, tam pačiam oro tarpui pramušti reikia aukštesnės įtampos?
3. Kodėl poliarinės pašvaistės padažnėja ir suintensyvėja didžiausio saulės aktyvumo periodais?
4. Kodėl gerėja retinamų dujų laidumas? Ar tai būna bet kokiomis sąlygomis?
5. Kodėl, vengiant energijos nuostolių, aukštos įtampos linijų laidų paviršius daromas kiek galima lygesnis?
6. Elektronų greitis vakuuminėje lempoje matuojamas tūkstančiais kilometrų per sekundę, o nuosekliai prijungtame metaliniame laidininke — tik milimetrais per sekundę. Kodėl srovės stiprumas visur vienodas?

31.1. Kokia jėga veikia elektronus viduje plokščiojo kondensatoriaus, tarp kurio plokštelių yra 1,8 cm atstumas ir 400 V įtampa?

31.2. Pro vakuume esantį kondensatorių lygiagrečiai jo plokštelėms skrieja elektronai 85 000 km/s greičiu. Plokštelių ilgis 6,5 cm. Prijungus prie kondensatoriaus įtampą, elektronai nukrypsta link vienos plokštelės 1,8 mm. Apskaičiuokite juos veikiančio elektrinio lauko stiprumą.

32 paskaita

VAKUUMINĖS ELEKTRONIKOS PAGRINDAI

§ 32.1. Elektros srovė vakuume

Daugumos šiuolaikinių elektroninių prietaisų veikimo pagrindą sudaro vakuume (§ 4.5) plintantis elektronų srautas. Kaipgi sukuriama srovė vakuume?

Elektronų šaltinis vakuume

Pratęskime bandymą su švytinčiu praretintų dujų vamzdžiu (31.7 pav.). Dar labiau retinant dujas, švytėjimas silpnės, kol visiškai išnyks. Giliame vakuume srovė nutrūksta, nors tarp vamzdžio elektrodų ir veikia įtampa. Tai suprantama: vamzdyje lieka tiek mažai molekulių, kad jos juda praktiškai nesusidurdamos viena su kita. Srovei reikalinga smūginė jonizacija nutrūksta.

Kad elektros srovė tekėtų vakuumu, vamzdyje turi būti elektringų dalelių šaltinis. Tokiu šaltiniu gali būti smarkiai įkaitintas metalas. 700—800 °C temperatūroje metalai pradeda intensyviai „garinti“ — spinduliuoti — elektronus. Šis procesas vadinamas **termoelektronine emisija**, o taip atsiradę elektronai — **termoelektronais**. Netekęs elektronų metalas įsielektrina teigiamai, todėl išlėkę elektronai kaupiasi prie jo paviršiaus ir sudaro neigiamą tūrinį krūvį — *elektronų debesėlį*, kuris stabdo tolimesnį elektronų „garavimą“. Tačiau sudarius priešingos krypties elektrinį lauką, termoelektronai bus išsiurbiami iš debesėlio ir kryptingai judės vakuumu — tekės elektros srovė.

Elektronų srautas praktiškai neturi inercijos, vakuume lengva jį valdyti keičiant elektrinį lauką. Dėl šių savybių elektros srovė vakuume plačiai pritaikoma technikoje elektroninėse lempose, fotoelementuose ir kituose elektroniniuose prietaisuose. Sklindantis vakuume elektronų pluoštas „piešia“ vaizdą televizoriaus ekrane, sukuria Rentgeno spindulius. Vėliau su šiais prietaisais susipažinsime išsamiau.

§ 32.2. Dviejų elektrodų elektroninė lempa (diodas)

Dvejopa katodo paskirtis

Paprasčiausią vakuuminį prietaisą — elektroninę lempą **diodą** — sudaro stiklinis arba metalinis balionas, iš kurio išsiurbtas oras. Vienas iš dviejų elektrodų — katodas — yra ir elektronų šaltinis: jis įkaitinamas leidžiant srovę iš nedidelės įtampos (U_k) šaltinio. Tarp katodo ir anodo jungiama valdomoji įtampa, vadinama anodo įtampa

32.1 pav.

(U_a). Kol katodas šaltas, srovės tarp katodo ir anodo nėra. Tačiau įjungus katodo kaitinimą grandinėje tuojau atsiranda srovė, nes anodas traukia išspinduliuotus termoelektronus, o katodas juos stumia (32.1 pav., *a*). Srovę vakuume galima reguliuoti dviem būdais: keičiant anodo įtampą arba katodo temperatūrą.

Kodėl negalioja Omo dėsnis?

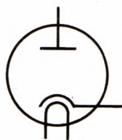
Aiškinantis elektroninio prietaiso savybes, svarbu žinoti, kaip juo tekanti srovė priklauso nuo įtampos. Ši priklausomybė, kaip jau minėjome, vadinama prietaiso **voltamperine charakteristika.** Braižant voltamperinės charakteristikos grafiką, horizontalioje ašyje atidedamos įtampos vertės, o vertikalioje — jas atitinkančios srovės stiprumo vertės (32.2 pav.).

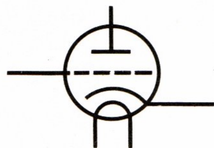
Srovei tekant vakuumu, jos stiprumas priklauso nuo įtampos panašiai kaip tekant dujomis, kurias veikia jonizatorius (§ 31.1). Didinant anodo įtampą, elektronų debesėlio tankis mažėja, srovės stiprumas didėja (32.2 pav., grafiko dalis *OA*), kol šios „atsargos" išsenka; kiek elektronų per sekundę išlekia iš katodo, tiek pat patenka į anodą. Toliau didinant įtampą, srovė negali stiprėti — pasiekta **soties srovė** I_s (grafiko dalis *AB*). Padidinti soties srovę galima tik pakėlus katodo temperatūrą (grafiko dalis A_1B_1).

32.1. Ar galima keisti katodinės lempos soties srovę? Jei galima, tai kaip?

32.2. Kai elektroninės lempos anodo grandinė nesujungta, erdvinis krūvis joje lieka pastovus, nors katodas būna įkaitęs ir iš jo visą laiką išlekia elektronai. Kodėl?

32.2 pav.


32.3 pav.


32.5 pav.

Svarbiausia diodo savybė

Jeigu diodui suteiksime priešingos krypties įtampą, t. y. šaltinio teigiamą polių sujungsime su įkaitintu elektrodu, tai elektrinis laukas stabdys termoelektronus ir srovė grandinėje nutrūks (32.1 pav., *b*). Taigi *diodu srovė gali tekėti tik viena kryptimi*. Ši diodo savybė naudojama kintamajai srovei išlyginti, t. y. paversti vienos krypties srove. Sutartinis diodo žymėjimas schemose parodytas 32.3 paveiksle.

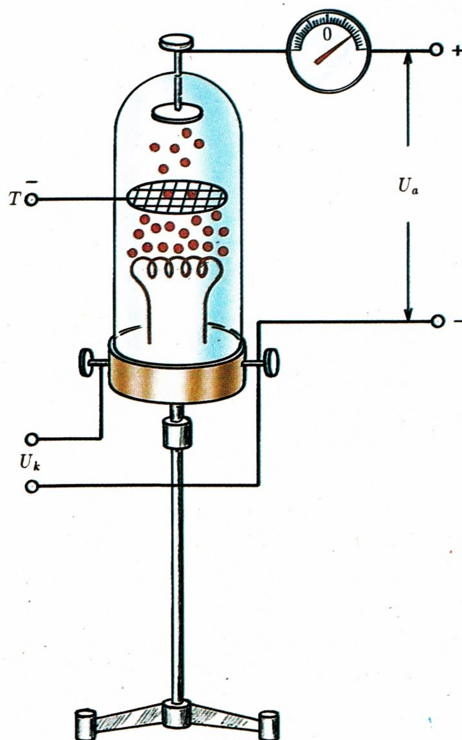
§ 32.3. Trijų elektrodų elektroninė lempa (triodas)

Svarbiausia triodo savybė

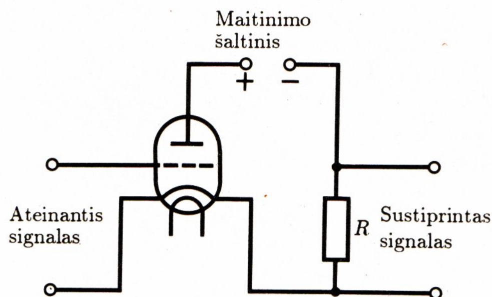
Diodas tik praleidžia arba nepraleidžia srovę. Jis nepritaikytas srovei valdyti — stiprinti ar silpninti. O tai elektronikoje labai svarbu. Šią užduotį atlieka sudėtingesnė elektroninė lempa **triodas.** Triodas skiriasi nuo diodo iš esmės tuo, kad tarp anodo ir katodo yra įterptas trečias elektrodas, vadinamas **tinkleliu.** Triodo konstrukcija pavaizduota 32.4 paveiksle, o sutartinis žymėjimas schemose — 32.5 paveiksle.

Tinklelio vaidmuo triode

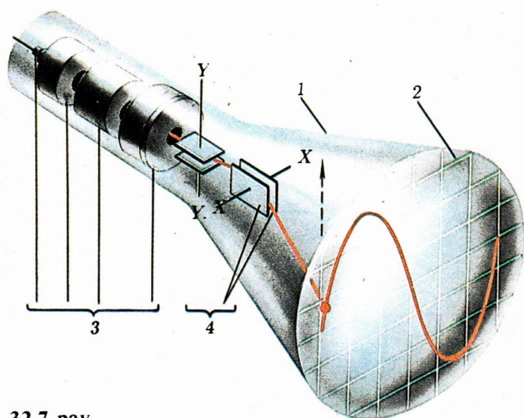
Tinklelis *T* gali būti plonos vielos spiralė, apsivijusi apie katodą. Būdamas arti įkaitinto katodo, tinklelis savo elektriniu lauku stipriai veikia elektronų debesėlį. Įelektrinus tinklelį katodo atžvilgiu neigiamai, jo elektrinis laukas stabdo elektronų judėjimą link anodo — silpnina srovę arba visai ją nutraukia. Priešingai, teigiamai įelektrintas tinklelis traukia elektronus iš debesėlio ir didina anodo srovę. Vadinasi, kai tinklelio įtampa kad ir nežymiai kinta, tuos kitimus



32.4 pav.



32.6 pav.



32.7 pav.

nevėluodama atkartoja anodo grandinės srovė. Todėl triodai radiotechnikoje naudojami silpniems įtampos svyravimams stiprinti. Stiprinimo, naudojantis triodu, schema parodyta 32.6 paveiksle. Stiprinamieji svyravimai patenka tarp triodo tinklelio ir katodo — tai lempos „durys". Atitinkamai kintanti anodo srovė teka varža *R*, ir tarp jos galų susidaro tokie pat, tik didesni įtampos svyravimai.

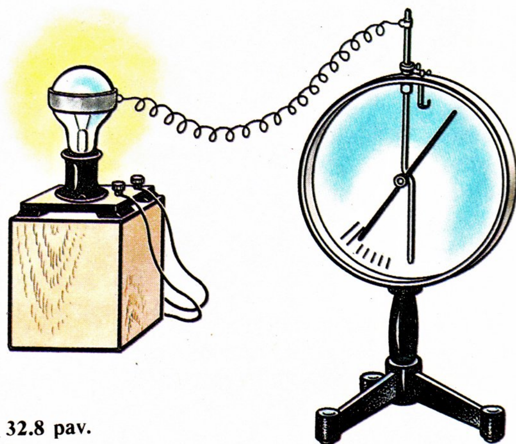
§ 32.4. Elektroninis vamzdis

Kas vedžioja elektroninį „pieštuką"?

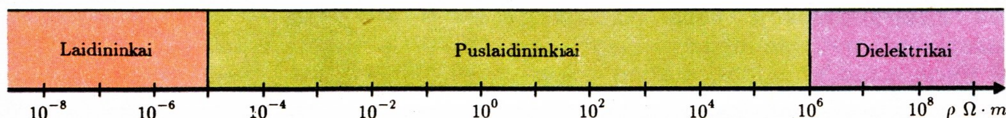
Greiti elektronai, atsimušdami į kai kurias medžiagas, sukelia jų švytėjimą. Tokios medžiagos vadinamos **liuminoforais.** Kuo daugiau atsimušančių elektronų, tuo švytėjimas stipresnis. Šiuo principu galima elektrinius signalus paversti šviesos ir spalvų signalais. Keičiant elektronų pluoštą — jo stiprumą ir kryptį, atitinkamai keisis bombarduojamo liuminoforo švytinčios dėmelės ryškumas ir vieta. Toks elektroninis „pieštukas" piešia vaizdą **elektroniniuose vamzdžiuose.**

Elektroninį vamzdį (32.7 pav.) sudaro storasienė kolba (*1*), iš kurios išsiurbtas oras. Priekinė kolbos sienelė — ekranas (*2*) — iš vidaus padengta liuminoforu, kuris švyti, veikiamas greitų elektronų. Kolboje įmontuotas **elektronų prožektorius** (*3*) — įtaisas, kuris sukuria elektronų srautą ir jį suglaudžia į siaurą spindulį. Elektronų spindulio kryptį (elektronų lėkimo kryptį) galima valdyti elektriniu arba magnetiniu lauku. Valdantis elektrinis laukas sudaromas tarp dviejų plokštelių: neigiamai įelektrinta plokštelė elektronus stumia, o teigiamai — traukia. Vamzdyje įmontuotą spindulio valdymo sistemą (*4*) sudaro dvi horizontalios („*Y*" valdymas) ir dvi vertikalios („*X*" valdymas) plokštelės. Elektriniai signalai (pvz., atsiradę televizoriuje priimant transliuojančios stoties bangas) keičia įtampą tarp vienos ir kitos poros plokštelių, ir elektronų spindulys verčiamas judėti ekranu — „piešti" elektrinį signalą atitinkantį vaizdą.

Liuminoforų švytėjimas neturi inercijos — užgęsta tą pačią akimirką, kai liaujasi elektronų bombardavimas. Tačiau žmogaus sąmonė išlaiko užfiksuotą vaizdą 1/16 sekundės dalį, todėl greitai atsirandančių ir išnykstančių švytinčių taškų mozaiką žmogus suvokia kaip ištisinį švytintį vaizdą.



32.8 pav.



33.1 pav.

Elektroniniai vamzdžiai naudojami greitiems periodiniams procesams tirti, stebėti, užrašyti (oscilografų vamzdžiai), vaizdui televizorių ekranuose atkurti (kineskopai, § 47.2), atspindėtiems radiolokacijos signalams registruoti bei matuoti (radiolokatorių vamzdžiai, § 47.1).

? *1. Apjuosus šviečiančios elektros lemputės stiklą metaline folija, prijungtas prie folijos elektroskopas įsielektrina teigiamai (32.8 pav.). Kodėl?*
2. Kodėl elektronų debesėlis trukdo išlėkti iš metalo naujiems elektronams?
3. Kodėl diodas dažnai vadinamas „elektroniniu ventiliu“?

32.3. Kokiu tikslu elektroninėse lempose elektroninio spindulio kelyje įtaisomi du plokštieji kondensatoriai, kurių elektrodai vieni kitiems statmeni? Kuo galima pakeisti tuos kondensatorius?

32.4. Katodinių spindulių vamzdyje įtaisytas plokščiasis kondensatorius, kurio plokštelių ilgis 4,5 cm, o atstumas tarp jų 1,8 cm. Kokia įtampa veikia tarp kondensatoriaus plokštelių, jeigu katodinių spindulių pluoštas, sklindantis lygiagrečiai joms, nukrypsta 1,2 mm? Katodinių spindulių elektronų greitį laikykite lygiu 50 000 km/s. **Pakartokite** § 23.1, 23.2.

2.5 skyrius

ELEKTROS SROVĖ PUSLAIDININKIUOSE

33 paskaita

„ELEKTRONINIŲ SMEGENŲ“ MEDŽIAGOS

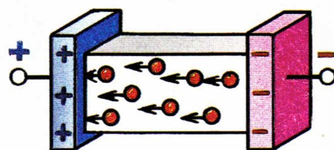
§ 33.1. Puslaidininkių savybės

Pasiekusi tobulumo viršūnę, vakuuminė elektronika staiga pradėjo užleisti savo pozicijas naujai atsiradusiems *puslaidininkiniams* prietaisams. Kas gi tie puslaidininkiai, iš kurių gaminami itin maži ir lengvi, ekonomiški, patvarūs ir patikimi įvairiausios paskirties prietaisai, iš pagrindų pakeitę šių dienų radijo, televizijos, garso aparatūrą, ryšių sistemas? Tai jų dėka atsirado skaičiavimo mašinos, padedančios atlikti protinį darbą, automatizavimo sistemos, gebančios valdyti be žmogaus ištisus cechus, vairuoti lėktuvus. Puslaidininkiai — medžiaga lazeriams ir Saulės baterijoms. Sunku net apžvelgti visus jų pritaikymus, kurių kasmet vis daugėja.

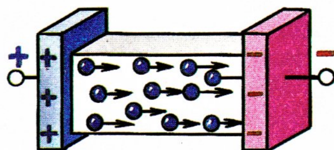
Kas tie puslaidininkiai?

Puslaidininkiais vadiname medžiagas, kurios pagal savo elektrinį laidumą užima tarpinę padėtį tarp laidininkų ir dielektrikų (33.1 pav.). Būdinga tai, kad jų laidumas labai kinta priklausomai ir nuo menkiausio priemaišų kiekio, ir nuo išorinių sąlygų: šviesos, temperatūros, slėgio ir kt. Šiuo

metu elektrotechnikoje bene plačiausiai naudojamos puslaidininkinės medžiagos yra silicis, galio arsenidas, mažiau — germanis, selenas ir kai kurie kiti junginiai (žr. periodinę elementų lentelę).



a



b

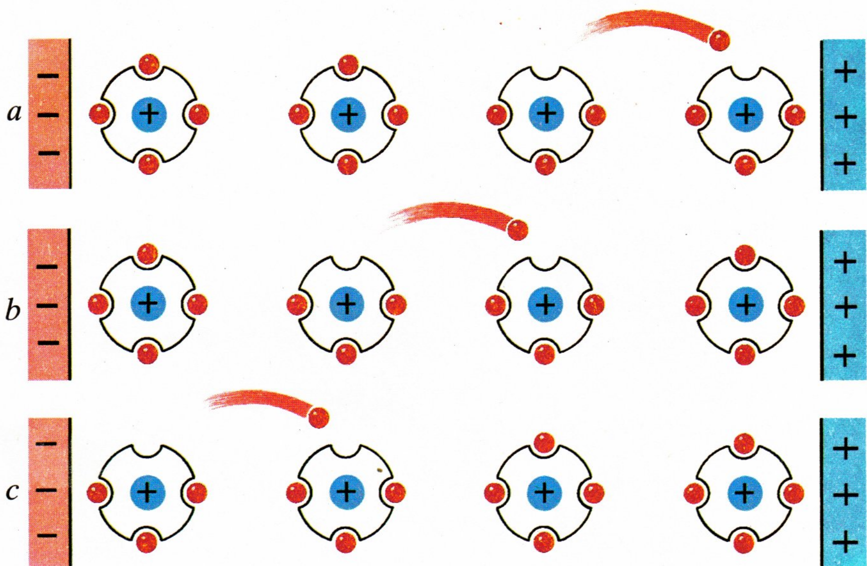
33.2 pav.

§ 33.2. Puslaidininkių laidumas

Dvejopas laidumas puslaidininkiuose

Pažvelkime mintimis į grynos puslaidininkinės medžiagos, pavyzdžiui, germanio ar silicio, vidų. Tai periodinės lentelės IV grupės elementai, turintys išoriniame sluoksnyje po 4 elektronus. Žemoje temperatūroje atomai taisyklingai išsidėstę kristalinėje gardelėje, elektronai surišti su atomais, o laisvųjų elektronų beveik nėra. Toks kristalas — izoliatorius. Tačiau kylant temperatūrai kai kurie elektronai sukaupia pakankamai energijos ryšiui su atomu nutraukti. Atsiranda laisvųjų elektronų, ir tuo daugiau, kuo aukštesnė temperatūra. Sudarius elektrinį lauką, laisvieji elektronai judės, puslaidininkiu tekės srovė (33.2 pav., *a*). Su laisvaisiais elektronais susijęs puslaidininkio laidumas vadinamas **elektroniniu laidumu** arba sutrumpintai **n laidumu** (iš lot. žodžio *negativus* — neigiamas).

Kita vertus, elektrono netekęs atomas — teigiamas jonas — judėti kristale negali, tačiau gali pritraukti gretimo atomo



33.3 pav.

elektroną. Atrodytų, tarsi likusią tuščią elektrono vietą, vadinamą **skyle**, užpildė gretimo atomo elektronas, savo ruožtu palikdamas jame skylę: perėjo skylė, o drauge — teigiamas krūvis. Todėl paprastumo dėlei ir sakoma, kad puslaidininkyje kartu su elektronu atsirado pernešanti teigiamą krūvį skylė. Elektriniame lauke skylės „juda" prieš lauko kryptį (33.3 pav.). Jų lemiamą laidumą vadiname **skyliniu laidumu** arba trumpiau **p laidumu** (iš lot. žodžio *positivus* — teigiamas) (33.2 pav., *b*).

Gryname puslaidininkyje elektronai ir skylės atsiranda kartu — poromis, taigi jų skaičius būna vienodas. Tokio puslaidininkio laidumas, pusiau elektroninis ir pusiau skylinis, vadinamas **savuoju laidumu**.

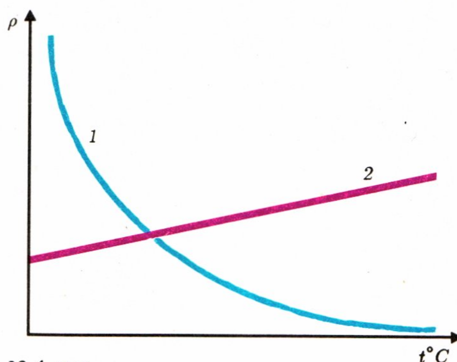
Puslaidininkių laidumas, kaip buvo minėta, labai priklauso nuo temperatūros. Šylant jų varža mažėja, taigi puslaidininkiams būdingas *neigiamas* temperatūrinis varžos koeficientas (33.4 pav., kreivė *1*). Absoliutinėmis vertėmis jis 10—20 kartų didesnis negu metalų (33.4 pav., tiesė *2*). Pakitus temperatūrai vienu laipsniu, metalo varža padidėja maždaug 0,4%, o puslaidininkio varža sumažėja 6—8%.

Automatiniai gaisro sargybiniai

Puslaidininkiniai prietaisai, kurių veikimas pagrįstas jų varžos kitimu kintant temperatūrai, vadinami **termistoriais** arba **termorezistoriais.** Termistorius (33.5 pav.) sudarytas iš korpuso (*1*), puslaidininkinio elemento (*2*) ir kontaktinių laidų (*3*).

Paprastos konstrukcijos, mažų matmenų, patikimi ir labai jautrūs temperatūrai termistoriai yra įvairių automatikos įtaisų svarbiausias elementas. Tokie įtaisai automatiškai signalizuoja apie variklių perkaitimą, per daug įkaitusį orą, prasidedantį gaisrą ir kt. Temperatūrai neleistinai pakilus, puslaidininkio varža sumažėja ir grandine ima tekėti srovė, kuri išjungia variklį, įjungia sireną, ventiliaciją, gaisro gesinimo įtaisus. Jautrūs šiuolaikiniai termistoriai matuoja temperatūros skirtumus milijonosios laipsnio dalies tikslumu. Parabolinis reflektorius su termistoriumi židinyje gali užregistruoti net tolimą menką šiluminį objektą, pavyzdžiui, skrendantį paukštį ar bėgantį žvėrelį. Tokie šiluminiai radarai gali būti naudojami raketai automatiškai vesti į šilumą spinduliuojantį taikinį.

Sutartinis termistorių žymėjimas schemose parodytas 33.6 paveiksle.



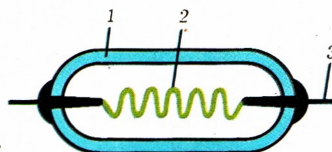
33.4 pav.



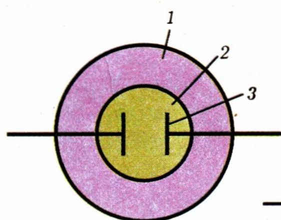
Simas Klaidelė išrado termistorinį vėjo greičio matuoklį (33.7 pav.). Ventiliatoriui artėjant arba sparneliams sparčiau sukantis, miliampermetro, sugraduoto m/s, rodyklė tikrai rodo oro srovės greitį.
Kodėl šis prietaisas pasirodė netinkamas lauko sąlygomis?

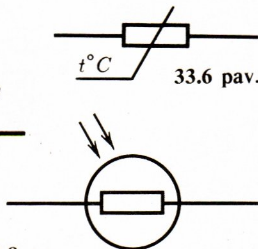
„Regintys" puslaidininkiai

Puslaidininkio surištieji elektronai gali išsilaisvinti ir gavę energijos iš šviesos ar kitokių



33.5 pav.





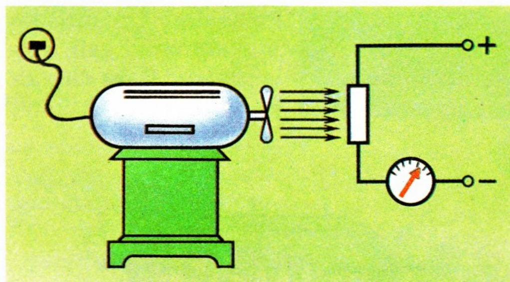
33.6 pav.

33.9 pav.

33.8 pav.

spindulių. Todėl kai kurių puslaidininkių (pavyzdžiui, seleno ir jo junginių) elektrinė varža kinta priklausomai nuo apšviestumo. Prietaisai, kurių veikimas pagrįstas šia puslaidininkių savybe, vadinami **fotorezistoriais.** Fotorezistorių sudaro skaidri dielektriko plokštelė (*1*), iš vienos pusės padengta plonu puslaidininkio sluoksniu (*2*). Šis sluoksnis skiria srovei laidžius elektrodus (*3*) (33.8 pav.). Apšvietus puslaidininkį, jame padaugėja krūvininkų, sumažėja varža ir grandine ima tekėti apie tai signalizuojanti srovė. Parenkant atitinkamus puslaidininkius, gaminami fotorezistoriai, jautrūs tik kuriai nors spalvai. Tuo jie yra tobulesni už termorezistorius, kurie neskiria šiluminių objektų. Fotorezistoriai plačiai taikomi įvairiausiose mokslo ir technikos srityse, ypač automatikoje ir skaičiavimo technikoje.

Sutartinis fotorezistorių žymėjimas schemose parodytas 33.9 paveiksle.



33.7 pav.

§ 33.3. Priemaišinis puslaidininkių laidumas

Daugumai elektronikos prietaisų reikalingi puslaidininkiai, kuriuose vyrauja vienokios rūšies — *n* arba *p* — laidumas. Tokie puslaidininkiai gaunami įterpiant į gryną kristalą labai mažą (apie $10^{-5}\%$) kiekį kitų elementų priemaišų. Tada šalia savojo laidumo atsiranda tūkstančius kartų didesnis papildomas **priemaišinis laidumas.**

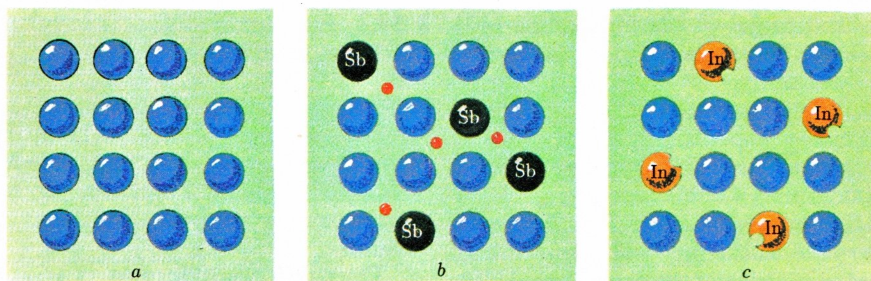
Kaip atsiranda priemaišinis laidumas

Dar kartą įsibraukime į būdingo puslaidininkio germanio kristalinę gardelę. Germanio atomas turi 4 valentinius elektronus, kurių kiekvienas sudaro elektronų porą su vienu kaimyninio atomo elektronu. Toji pora priklauso abiem atomams — sudaro kovalentinę atomų jungtį.

Gryname germanio kristale žemoje temperatūroje visų atomų valentiniai elektronai šitaip surišti, laisvųjų elektronų ir skylių nėra, kristalas nelaidus (33.10 pav., *a*).

Įterpus į germanio kristalą priemaišos, turinčios penkis valentinius elektronus (arseno, stibio, fosforo), keturi priemaišos atomo elektronai sudaro kovalentines jungtis su gretimais germanio atomais, o penktasis elektronas lieka silpnai surištas su savo atomu. Pastarasis nesunkiai atitrūksta ir padidina elektroninį germanio laidumą (33.10 pav., *b*). Priemaišos, sukuriančios elektroninį laidumą, vadinamos **donorinėmis priemaišomis** arba tiesiog **donorais.**

Skylinį laidumą germanis įgyja įterpus į jį priemaišos, turinčios tris valentinius elektronus (aliuminio, indžio, boro). Šiuo atveju priemaišos atomai gali sudaryti tik tris kovalentines jungtis. Dėl to germanio kristale atsiranda elektronų trūkumas — skylės, kurios ir sudaro skylinį laidumą (33.10 pav., *c*). Priemaišos, sukuriančios skylinį laidumą, vadinamos **akceptorinėmis priemaišomis** arba tiesiog **akceptoriais.**



33.10 pav.

? *1. Sugalvokite mechaninį skylinio laidumo modelį.*
2. Kodėl § 33.2 sakinyje: „Elektriniame lauke skylės „juda“ jėgų linijų kryptimi“, žodis „juda“ parašytas tarp kabučių?
3. Donoras ar akceptorius yra selenui arsenas?
4. Temperatūrai matuoti naudojami termorezistoriai ir termoelementai (§ 29.2). Kuo iš esmės skiriasi šie prietaisai?

33.1. Fotorezistorius, kurio varža tamsoje 25 kΩ, nuosekliai sujungtas su 5 kΩ rezistoriumi. Apšvietus fotorezistorių, srovės stiprumas grandinėje padidėjo 5 kartus. Kiek kartų sumažėjo fotorezistoriaus varža?

---

34 paskaita

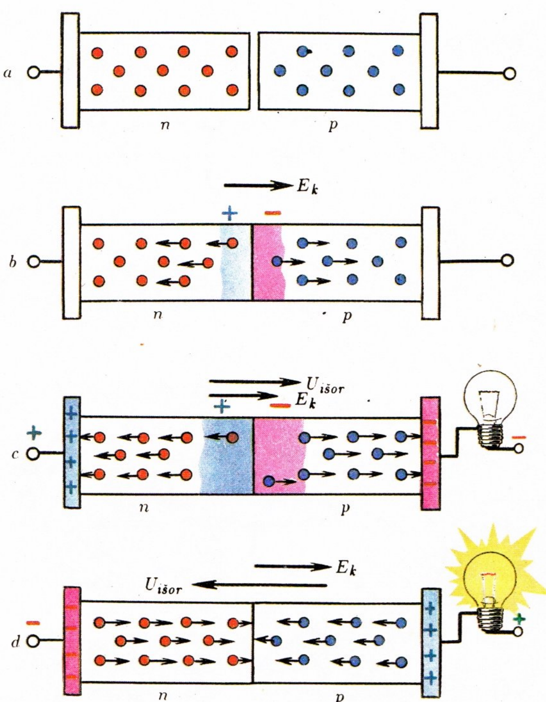
TRANZISTORIUS — TAI SUDĖTINGA IR PAPRASTA

§ 34.1. Puslaidininkių sandūros savybės

Visų puslaidininkinių prietaisų veikimo paslaptis glūdi reiškiniuose, vykstančiuose dviejų skirtingo laidumo puslaidininkių sandūroje, vadinamoje **pn sandūra**.

Kaip elektroninė teorija aiškina sandūros EVJ

Suglaudus *p* ir *n* puslaidininkius (34.1 pav., *a*), pro lietimosi paviršių prasideda krūvininkų difuzija. Elektronų koncentracija *n* puslaidininkyje kur kas didesnė negu *p* puslaidininkyje, todėl elektronai iš *n* puslaidininkio difunduoja į *p* puslaidininkį; skylės, suprantama, „difunduoja“ priešinga kryptimi. Susidūrę priešingo ženklo krūvi-



34.1 pav.

ninkai neutralizuoja vienas kitą — *rekombinuoja*. Dėl to abipus sandūros krūvininkų sumažėja, atsiranda 10^{-6}—10^{-7} m storio sritis, kurioje labai padidėjusi varža. Netekęs elektronų *n* puslaidininkis sandūros srityje įsielektrina teigiamai, o netekęs skylių *p* puslaidininkis sandūros srityje įsielektrina neigiamai (34.1 pav., *b*). Atsiradę elektros krūviai kuria savo elektrinį lauką. Taip sandūroje atsiranda potencialų skirtumas — kontaktinė EVJ (E_k). Elektrinio lauko jėgos stabdo tolesnę elektronų ir skylių difuziją, nes traukia elektronus atgal į *n* sritį, skyles — į *p* sritį. Nusistovi dinaminė pusiausvyra.

Elektroninis elektros ventilis

Prijunkime prie dviejų puslaidininkių sistemos išorinį elektros šaltinį. Jeigu *n* puslaidininkis bus sujungtas su šaltinio teigiamu poliumi, o *p* puslaidininkis — su neigiamu, tai išorinis elektrinis laukas bus tos pačios krypties kaip kontaktinis ir trauks krūvininkus nuo sandūros. Nelaidi sritis prie sandūros dar paplatės. Srovė per sandūrą netekės (34.1 pav., *c*).

Prijungus įtampą atvirkščiai (34.1 pav., *d*), išorinis elektrinis laukas bus nukreiptas prieš kontaktinį, kompensuos jį ir skatins elektronus bei skyles judėti per sandūrą. Grandine tekės elektros srovė.

Taigi *pn* sandūra yra laidi tik viena kryptimi, kaip ir dviejų elektrodų elektroninė lempa (§ 32.2). Todėl išnagrinėtoji dviejų puslaidininkių sistema su *pn* sandūra vadinama **puslaidininkiniu diodu**, arba **puslaidininkiniu ventiliu**.

Puslaidininkiniai diodai naudojami kintamajai srovei išlyginti radiotechnikoje, skaičiavimo technikoje ir kitur. Kaip jie žymimi schemose, parodyta 34.2 paveiksle.



34.2 pav.

§ 34.2. Puslaidininkinis triodas — tranzistorius

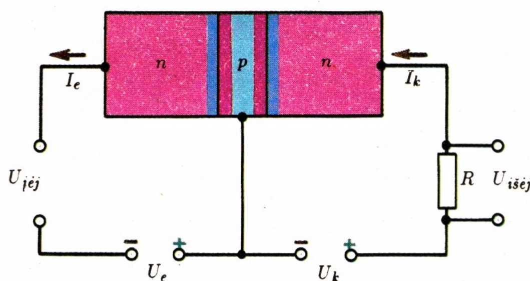
Tranzistoriaus konstrukcija

Puslaidininkinis prietaisas, turintis, kaip lempinis triodas, tris kontaktus ir taip pat skirtas srovei valdyti, vadinamas **tranzistoriumi**.

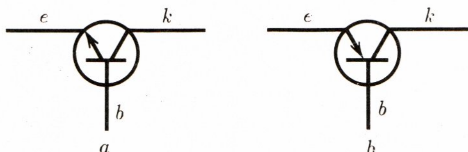
Tranzistorius sudarytas iš trijų puslaidininkių, atskirtų vienas nuo kito dviem *pn* sandūromis. Du kraštiniai puslaidininkiai yra vienodo laidumo, o vidurinysis — priešingo. Tranzistoriai, kuriuose vidurinis puslaidininkis yra elektroninio laidumo, vadinami *pnp* tranzistoriais, o tie, kurių vidurinis puslaidininkis yra skylinio laidumo — *npn* tranzistoriais. Abiejų tipų tranzistoriuose vyksta analogiški procesai. Tranzistoriaus vidurinioji dalis vadinama **baze** (*b*) (ji primena lempinio triodo tinklelį). Stiprinamoji (valdančioji) kintama įtampa, vadinama **įėjimo signalu** ($U_{įėj}$), patenka tarp bazės ir vienos kraštinės dalies, vadinamos **emiteriu** (*e*). Emiteris primena lempos katodą. Kita kraštinė dalis vadinama **kolektoriumi** (*k*); jo grandinėje susidaro sustiprintas išėjimo signalas ($U_{išėj}$). Kiekviena dalis turi savo kontaktinį išvadą. Tranzistoriui reikia dviejų elektros šaltinių: mažesnės įtampos *emiterio šaltinio* (U_e) ir didesnės įtampos *kolektoriaus šaltinio* (U_k). Tranzistoriaus *npn* jungimo schema parodyta 34.3 paveiksle, o sutartinis tranzistorių žymėjimas schemose — 34.4 paveiksle, *a* ir *b*.

Kaip įjungti tranzistorių

Tranzistoriaus emiterio šaltinis visuomet jungiamas taip, kad emiterio—bazės sandūra (*np*) būtų laidi srovei: teigiamas polius jungiamas su baze, o neigiamas — su emiteriu (jeigu tranzistorius *npn*). Kolektoriaus šaltinis, atvirkščiai, turi būti prijungtas taip, kad bazės-kolektoriaus sandūra



34.3 pav.



34.4 pav.

(*pn*) būtų nelaidi srovei: teigiamas polius jungiamas su kolektoriumi, o neigiamas — su baze.

▲ **34.1.** Nubraižykite tranzistoriaus *pnp* jungimo schemą.

Kaip tranzistorius stiprina

1. Prijungus stiprinamąjį signalą ($U_{įėj}$), jo įtampa veikia emiterio srovę (I_e) — tada emiteriu ir baze teka ne nuolatinė, o pulsuojanti signalo dažniu srovė.

2. Kadangi tranzistoriaus bazė labai plona, vos keleto mikrometrų ir dar mažesnio storio, tai dauguma emiterio srovės elektronų nespėja rekombinuoti su bazės skylėmis, difunduoja į *pn* sandūrą ir padidina jos laidumą.

3. Sumažėjus *pn* sandūros varžai, kolektoriaus šaltinio įtampa (U_k) kitaip pasiskirsto tarp šios sandūros varžos ir rezistoriaus *R* varžos — didesnė jos dalis tenka rezistoriui *R*. Taigi rezistoriaus *R* įtampa kinta taip pat, kaip įėjimo signalo įtampa $U_{įėj}$, tik ji didesnė. Ji ir yra sustiprintasis signalas ($U_{išėj}$).

Tranzistorių era

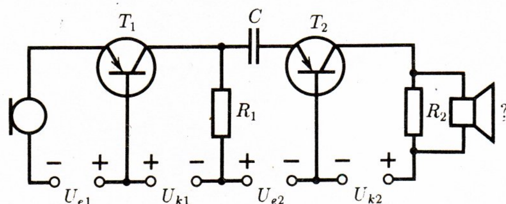
Tranzistoriai audringai įsiveržė į mūsų amžiaus mokslą, buitį ir techniką. Panaudojant tranzistorius, silpnais elektriniais signalais valdomos galingos elektros grandinės. Tranzistoriai stiprina silpnus antenų sugautus radijo ir televizijos signalus, mikrofonais bei adapteriais tekančios srovės virpesius. Pasitelkus tranzistorius, milžiniškais nuotoliais valdomi kosminiai aparatai, kuriami mikrogabaričiai skaičiavimo technikos prietaisai. Vien tik elektroniniame rankiniame laikrodyje yra apie 10 000 tranzistorių.

Už tranzistoriaus išradimą JAV fizikai Džonas Bardynas, Volteris Bratenas ir Viljamas Šoklis 1956 m. apdovanoti Nobelio premija.

Šių dienų pramonė daugiausia gamina ne pavienius puslaidininkinius elementus (diodus, tranzistorius), o sudėtingas schemas iš daugybės įvairios paskirties elementų, kurie kartu „išauginami" vienoje puslaidininkio plokštelėje. Tai — vadinamosios mikroschemos. Vieno tranzistoriaus matmenys jose būna vos mikrono eilės. Pačiose didžiausiose, kvadratinio centimetro ploto, mikroschemose elementų gali jau būti dešimt tūkstančių!

Puslaidininkių tyrimai Lietuvoje

Lietuvoje plačiai išvystyta ir puslaidininkinių prietaisų gamyba, ir jų tyrimai. Puslaidininkių fizikos pradininkas Lietuvoje buvo akademikas P. Brazdžiūnas, pradėjęs šiuos darbus 1950 m. Vilniaus Universitete. O 1967 m. Lietuvos Mokslų Akademijoje jau buvo įkurtas atskiras Puslaidininkių Fizikos institutas, vadovaujamas akademiko Juro Poželos. Jame atliekami plonų puslaidininkinių sluoksnių, puslaidininkių optinių savybių ir kitokie tyrimai, kuriami nauji pus-



34.5 pav.

laidininkiniai prietaisai. Čia pasiekta pasaulinio lygio laimėjimų, padaryta apie tris šimtus išradimų. Labiausiai institutas išgarsėjo vadinamų karštųjų elektronų puslaidininkiuose tyrimais. Stipriame labai dideliu dažniu kintančiame elektriniame lauke laisvieji elektronai virpa labai didele amplitude, juda dideliais greičiais — tarsi aukštoje temperatūroje. Todėl ir kalbama apie karštus elektronus... šaltame puslaidininkyje. Tirdami įvairius su jais susijusius reiškinius, instituto mokslininkai J. Požela, K. Repšas ir S. Ašmontas padarė pirmąjį Lietuvoje mokslinį atradimą.

Įdomius puslaidininkių tyrimus atlieka Vilniaus universiteto fizikai, pasitelkę nuostabią priemonę — lazerius. Tiria juos ir mokslininkai,— dirbantys kituose mokslo centruose, puslaidininkinių prietaisų gamybos įmonėse. Puslaidininkių galimybės dar anaiptol neišsemtos.

Plačiau apie čia minėtas ir neminėtas puslaidininkių savybes ir nuostabius puslaidininkinius prietaisus galima paskaityti knygelėje: K. Valacka, „Puslaidininkiai" („Fizikos mokykla", Nr. 16), 1990 m.

? *1. Kodėl puslaidininkiniai prietaisai pirmiausia imti taikyti lėktuvų, raketų ir kosminių laivų aparatūroje?*

2. Portatyvinis radijo imtuvas buityje vadinamas „tranzistoriumi". Kokia taip vadinant daroma klaida?

3. Kuo vientisa mikroschema pranašesnė už schemą, surinktą iš atskirų elementų?

4. Kuri tranzistoriaus sritis analogiška vakuuminio triodo anodui?

5. Gal žinote, kur Lietuvoje gaminami puslaidininkiniai prietaisai?

Simas Klaidelė pasiūlė kompaktiško dviejų laipsnių tranzistorinio stiprintuvo projektą (34.5 pav.).
Kodėl pagal šią schemą sumontuotas stiprintuvas neveikė?

34.2. Kodėl tranzistoriaus bazės plotis turi būti mažas?
34.3. Kodėl priemaišų koncentracija tranzistoriaus emiteryje yra daug didesnė negu bazėje?
34.4. Kokia energija vartojama tranzistoriui stiprinant signalą?

Pakartokite § 21.1.

3 dalis

ELEKTROMAGNETIZMAS

3.1 skyrius

MAGNETINIS LAUKAS

„Aš nesakyčiau, kad visiška nesąmonė priskirti magnetui dvasią“.

Anglų fizikas Viljamas Gilbertas (1544—1603)

35 paskaita

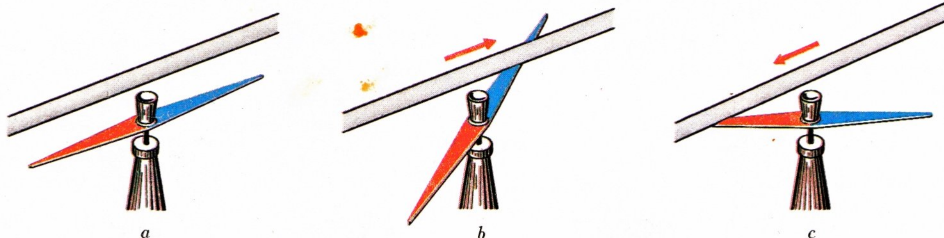
MAGNETINIO LAUKO SŪKURIAI

§ 35.1. Elektros srovės ir magneto sąveika

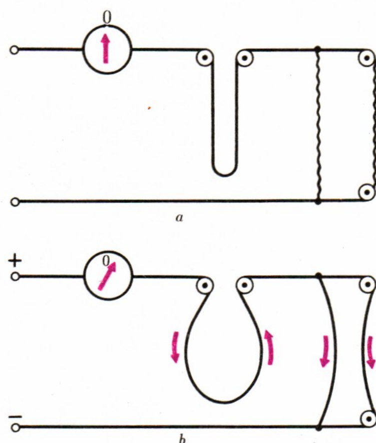
Magnetiniai reiškiniai, nuo seniausių laikų kėlę žmonių nuostabą ir susidomėjimą, yra neatskiriamai susiję su elektros krūvių judėjimu — elektros srove. Todėl šių dienų fizika nagrinėja įvairius *elektromagnetinius* reiškinius. Jie vaidina milžinišką vaidmenį visame mus supančiame pasaulyje nuo atomų iki kosminių objektų. Jų pagrindu veikia visa šių dienų energetika, ryšių ir kita technika — elektros generatoriai ir varikliai, radijas ir televizija, telefonai ir magnetofonai; jie pritaikomi transporte, skaičiavimo technikoje, automatikoje ir daug kur kitur. Galime įsivaizduoti, kad, „išnykus“ elektromagnetizmui, apmirtų visa civilizacija.

Nei traukianti, nei stumianti jėga

Ryšys tarp elektrinių ir magnetinių reiškinių pastebėtas seniai. Kaupėsi faktai apie tai, kad įmagnetina geležį ir permagnetina kompasus žaibas. Tačiau elektrinių ir magnetinių reiškinių sąveiką ilgai nepavyko įrodyti moksliškai. Tyrinėtojai darė bandymus tikėdamiesi aptikti jėgas, veikiančias panašiai kaip gravitacinės arba elektrostatinės jėgos, t. y. traukos arba stūmos jėgas, veikiančias išilgai tiesės, einančios per sąveikaujančių kūnų centrus. Todėl tik 1820 m. danų fizikas Hansas Erstedas (1777—1851) bandymais įrodė, kad *laidininku tekanti srovė veikia magnetinę rodyklę, bet ne traukia ar stumia, o pasuka, kad ji būtų statmena srovės krypčiai* (35.1 pav., *a*, *b*). Pakeitus srovės kryptį, magnetinė rodyklė pasisuka į priešingą pusę (35.1 pav., *c*). Praktinė šio svarbaus fakto reikšmė buvo suvokta tik po keliasdešimties metų.



35.1 pav.



35.2 pav.

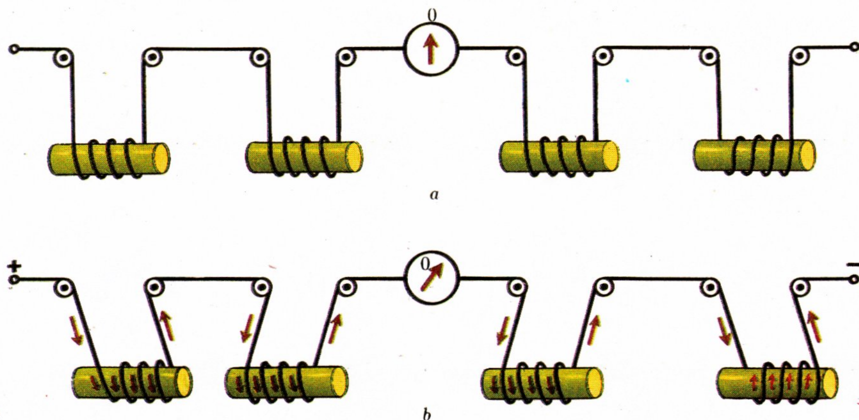
Iš H. Erstedo bandymų galima padaryti išvadą, kad erdvėje apie laidininką, kuriuo teka elektros srovė, yra sąveiką su magnetu perduodanti aplinka — **magnetinis laukas.** Vadinasi, magnetinį lauką kuria elektros srovė — judantys elektros krūviai. O jeigu tame magnetiniame lauke yra kitas laidininkas, kuriuo teka elektros srovė, tai dėl abiejų srovių magnetinių laukų sąveikos laidai veikia vienas kitą — traukia arba stumia. Šią srovių sąveiką atrado netrukus po H. Erstedo bandymų prancūzų fizikas André A m p e r a s (1775—1836). Jis nustatė, kad *viena kryptimi tekančios srovės viena kitą traukia, o tekančios priešingomis kryptimis viena kitą stumia* (35.2 pav.). Taip pat sąveikauja ir ritės, kai jomis teka srovė (35.3 pav.).

Prisiminę tai, kad ir nuolatinių magnetų kuriamas laukas yra susijęs su elektros krūvių judėjimu medžiagos viduje, t. y. su elektronų judėjimu atomuose, galime teigti: *magnetinis laukas — tai ypatingos formos materija, perduodanti judančių elektros krūvių sąveiką.*

Magnetinis laukas, kaip ir elektrinis, plinta erdvėje $3 \cdot 10^8$ m/s greičiu.

§ 35.2. Magnetinių laukų grafinis vaizdavimas

Magnetiniam laukui tirti galima naudoti magnetinę rodyklę arba laidininką, kuriuo teka elektros srovė. Įvairiuose lauko taškuose tokį bandomąjį kūną veikia įvairaus didumo ir krypties jėgos. Jas ištyrus galima sudaryti vaizdų magnetinio lauko „žemėlapį“ — nubraižyti vadinamąsias **magnetinio lauko linijas.** *Magnetinio lauko linijomis vadiname tokias linijas, kurių liestinės kiekviename taške sutampa su pasisukusios*



35.3 pav.

magnetinės rodyklės ašimi. Linijos kryptimi, kitaip sakant, magnetinio lauko kryptimi susitarta laikyti kryptį, kurią rodo magnetinės rodyklės *šiaurės* polius. Magnetinio lauko intensyvumą tokiame „žemėlapyje" rodo linijų tankis.

Magnetinio lauko „autoportretas"

Magnetinio lauko linijas galima akivaizdžiai pademonstruoti. Perverkime per kartono lapą laidą, ant kartono užberkime geležies pjuvenų ir padėkime mažų magnetinių rodyklių. Įjunkime srovę ir lengvai krestelėkime. Magnetinės rodyklės pasisuks, šiaurės poliumi rodydamos magnetinio lauko kryptį, o pjuvenos įsimagnetins ir išsidėstys apie laidą tam tikra tvarka — koncentriniais apskritimais, kurie atitinka magnetines linijas (35.4 pav., *a*). Pakeitus srovės kryptį laidininke, magnetinio lauko linijų forma nepakinta, tik magnetinės rodyklės pasisuka 180° kampu.

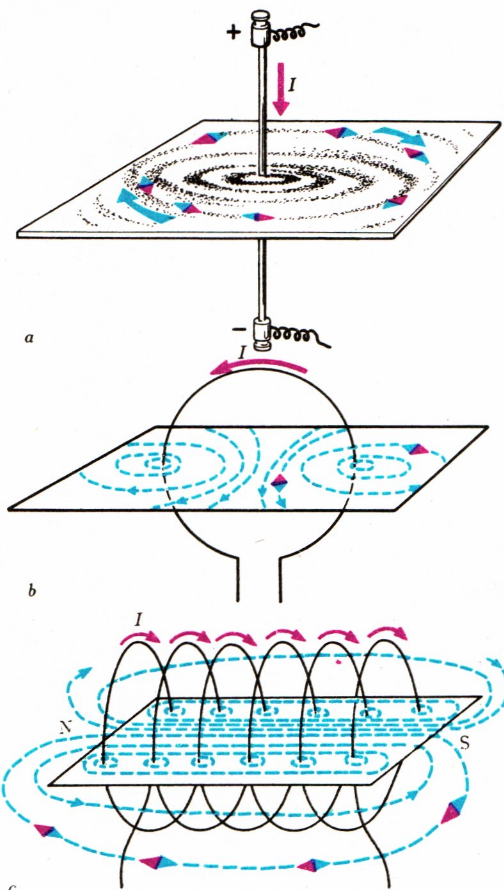
Tokiu pat būdu galima ištirti ir apskritiminės srovės (35.4 pav., *b*), bei ritės (solenoido), kuria teka srovė (35.4 pav., *c*), magnetinius laukus. Pastarojo linijos eina taip pat kaip tiesaus nuolatinio magneto lauko linijos. Ritės galas, iš kurio linijos išeina, atitinka magneto šiaurės polių. Pakankamai ilgo solenoido viduje susidaro magnetinis laukas, kurio kryptis ir intensyvumas visuose taškuose vienodi. Toks laukas vadinamas **vienalyčiu**.

Magnetinių linijų savybės

Kaip pastebėjome, magnetinių laukų linijoms būdingos šios savybės:

1. Per bet kurį magnetinio lauko tašką galima vesti tik vieną liniją, kitaip sakant, magnetinio lauko linijos niekur nesikerta.

2. Magnetinio lauko linijos visada yra *uždaros kreivės,* juosiančios laidininką, kuriuo teka srovė. Laukas, kurio linijos yra uždaros, vadinamas **sūkuriniu lauku**. *Magnetinis laukas yra sūkurinis*. Tuo jis

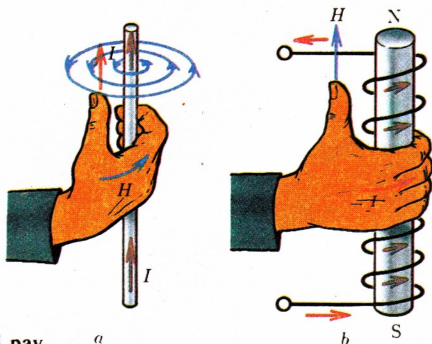


35.4 pav.

skiriasi nuo elektrinio lauko, kurio linijos nėra uždaros — prasideda teigiamame krūvyje ir baigiasi neigiamame. Ši magnetinių linijų savybė rodo, kad gamtoje nėra magnetinių krūvių, panašių į elektros krūvius.

Ranka vietoj magnetinės rodyklės

Srovės kuriamo magnetinio lauko kryptį galima nustatyti ir be magnetinės rodyklės — galima pritaikyti nesudėtingą **dešinės rankos taisyklę:** *jeigu dešine ranka apimsime laidininką taip, kad ištiestas nykštys rodytų*



35.5 pav.

srovės kryptį, tai pirštai rodys magnetinio lauko linijų kryptį (35.5 pav., *a*). Apskritiminės srovės arba solenoido magnetiniam laukui taikoma „atvirkščia" taisyklė: *dešine ranka reikia apimti ritę taip, kad pirštai rodytų srovės kryptį — tada ištiestas nykštys rodys magnetinio lauko linijų kryptį* (šiaurės polių) (35.5 pav., *b*).

▲ **35.1.** Taikydami dešinės rankos taisyklę nustatykite 35.3 paveiksle parodytų solenoidų magnetinius polius.

§ 35.3. Magnetinio lauko stiprumas

Eksperimentais nustatyta, kad, stiprėjant tekančiai laidininku srovei, proporcingai didėja magnetinio lauko intensyvumas, t. y. didėja jėga F, kuria tos srovės magnetinis laukas veikia magnetinę rodyklę ar kitą laidininką, kuriuo teka srovė. Kita vertus, toji jėga priklauso ir nuo lauko taško, kuriame ją matuojame, padėties. Pavyzdžiui, tiesiu laidu tekančios srovės magnetiniame lauke jėga F tolstant nuo to laido proporcingai mažėja. Ištyrus įvairius magnetinius laukus, galima įsitikinti, kad jėga F konkrečiame taške tuo mažesnė, kuo ilgesnė einanti per tą tašką magnetinio lauko linija. Tos pačios linijos taškuose jėga F vienoda. Atsižvelgiant į tai, įvedama **magnetinio lauko stiprumo** sąvoka.

„Tuščio" magnetinio lauko matas

Srovės kuriamo magnetinio lauko stiprumas H nusakomas santykiu

$$H=\frac{I}{l}, \qquad (35.1)$$

kuriame I — srovės stiprumas, l — magnetinės linijos, einančios per duotąjį tašką, ilgis.

Magnetinio lauko stiprumas — *vektorinis* dydis. Vektoriaus **H** kryptimi sutarta laikyti einančios per duotąjį tašką magnetinio lauko linijos kryptį. Vadinasi, vektorius **H** yra nukreiptas išilgai lauko linijos liestinės į tą pusę, kurią rodo magnetinės rodyklės šiaurės polius. Magnetinio lauko stiprumo SI vienetas yra A/m.

Pateiksime formules magnetinio lauko stiprumui skaičiuoti keliais būdingiausiais atvejais.

Tiesiu laidininku tekanti srovė kuria simetrišką magnetinį lauką (35.4 pav., *a*), kurio stiprumas nuotolyje r nuo laidininko yra

$$H=\frac{I}{2\pi r}. \qquad (35.2)$$

Kai laidas sulenktas *apskritimu* (35.4 pav., *b*), magnetinio lauko stiprumas to apskritimo centre išreiškiamas formule

$$H=\frac{I}{2r}; \qquad (35.3)$$

čia r — apskritimo spindulys.

Tekant elektros srovei *rite*, sudarytai iš n vijų (35.4 pav., *c*), magnetinio lauko stiprumas jos viduje

$$H=\frac{In}{l}; \qquad (35.4)$$

šiuo atveju l — ritės (!) ilgis.

▲ **35.2.** Ilgas solenoidas pagamintas iš izoliuotos 0,20 mm skersmens vielos, glaudžiai suvyniotos dviem eilėmis. Koks yra magnetinio lauko stiprumas solenoido viduje, kai juo teka 0,52 A srovė?

▲ **35.3.** Ant ilgo laidininko padaryta 6,0 cm spindulio kilpa. Raskite magnetinio lauko stiprumą kilpos centre, tekant laidininku 12 A srovei.

? *1. Kurioje Žemės rutulio vietoje abu kompaso rodyklės galai rodo į šiaurę?*
2. Įmagnetinus maišelį geležies pjuvenų, jis veikė kaip magnetas. Tačiau pjuvenas išpylus ir vėl supylus į maišelį, magnetinės savybės dingo. Kodėl?
3. Kodėl prieš veikiančio televizoriaus ekraną padėto kompaso rodyklė pradeda svyruoti?
4. Atliekant 35.4 paveiksle atvaizduotus bandymus, pakeitus srovės kryptį geležies pjuvenos staiga „pasišiaušia". Kaip tai paaiškinti?
5. Nustatykite, taikydami dešinės rankos taisyklę, 35.3 paveiksle parodytų solenoidų magnetinius polius.

35.4. Dviem laidžiais koncentriškais apskritimais, kurių spinduliai 20 ir 10 cm, teka 10 ir 6 A srovės. Raskite magnetinio lauko stiprumą apskritimų centre, kai srovės jais teka ta pačia kryptimi ir kai priešingomis kryptimis.

36 paskaita

MAGNETO PASLAPČIŲ ATSKLEIDIMAS

§ 36.1. Medžiagų magnetinės savybės

Iki šiol, kalbėdami apie magnetinį lauką, nesigilinome į tai, kokioje aplinkoje jis kuriamas — turėjome omenyje, kad tai vakuumas. Realiai atlikdami bandymus ore, praktiškai gauname tokius pat rezultatus: ore magnetinio lauko jėga tik 1, 00000038 karto didesnė negu vakuume. Tačiau įkišę į ritę, kuria teka srovė, įvairių medžiagų šerdis, matysime, kad kai kurios medžiagos labai pakeičia magnetinio lauko intensyvumą. Taip yra todėl, kad magnetiniame lauke jos pačios daugiau ar mažiau įsimagnetina, t. y. sukuria savo magnetinį lauką. Labiausiai įsimagnetinančios medžiagos yra vadinamieji **feromagnetikai.** Tai geležis, nikelis, kobaltas ir daugelis lydinių.

Magnetinių savybių palyginimas

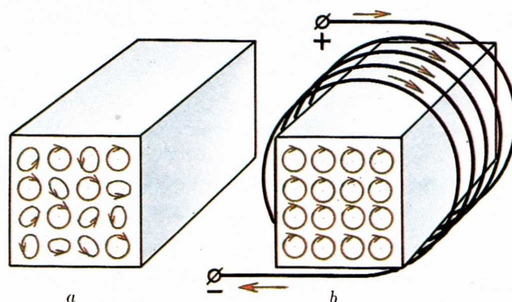
Medžiagos gebėjimą įsimagnetinti nusako vadinamoji **magnetinė skvarba.** Medžiagos magnetinė skvarba (μ) — tai skaičius, rodantis, kiek kartų jėga, kuria magnetinis laukas veikia magnetinę rodyklę arba laidininką, kuriuo teka srovė, toje medžiagoje yra didesnė negu vakuume. Kai kurių medžiagų magnetinės skvarbos pateiktos XVII lentelėje.

Neferomagnetinės medžiagos, kaip ir oras, praktiškai neturi įtakos magnetiniam laukui, todėl techniniuose skaičiavimuose jų magnetinė skvarba laikoma lygia vienetui. Feromagnetinės medžiagos šimtus ir tūkstančius kartų padidina srovės magnetinio lauko jėgą. Todėl jos plačiai naudojamos gaminant elektromagnetus, elektros variklius, generatorius, transformatorius ir kt.

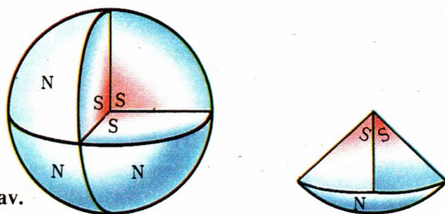
Elektroninė magnetizmo teorija

Nustatyta, kad magnetinės medžiagų savybės susijusios su atomų bei molekulių viduje cirkuliuojančiomis elektros srovėmis. Apie branduolį skriejantys elektronai sudaro uždaras elektros sroves, kurios kuria savus atominius bei molekulinius magnetinius laukus.

Jeigu šie elementarieji magnetiniai laukai orientuoti chaotiškai (36.1 pav., *a*), tai



36.1 pav.



36.2 pav.

atstojamojo magnetinio lauko stiprumas medžiagoje lygus nuliui — medžiaga nėra įsimagnetinusi.

Išoriniame magnetiniame lauke molekuliniai laukai daugiau ar mažiau orientuojasi viena kryptimi (36.1 pav., *b*) ir vieni kitus sustiprina — vyksta **magnetinė poliarizacija.** Medžiagos magnetinė skvarba μ rodo jos gebėjimą poliarizuotis.

Išnykus išoriniam magnetiniam laukui, šiluminis molekulių judėjimas ardo tvarkingą elementariųjų magnetinių laukų išsidėstymą. Vienos medžiagos išsimagnetina iš karto, kai tik nustoja veikęs išorinis magnetinis laukas. Jos vadinamos *magnetiškai minkštomis* medžiagomis. O kitos medžiagos, vadinamos *magnetiškai kietomis*, normaliomis sąlygomis gana ilgai lieka įmagnetintos. Iš jų daromi nuolatiniai magnetai.


Simas Klaidelė sumanė sukurti vienpolį magnetą: trimis pjūviais per centrą supjaustė geležinį rutulį į 8 piramides (36.2 pav.). Visas piramides įmagnetino taip, kad viršūnėse būtų pietų poliai, o rutulio paviršiuje — šiaurės. Po to vėl suklijavo rutulį. Kodėl rutulys neturėjo jokių magnetinių savybių?

---

§ 36.2. Magnetinio lauko ir elektros srovės sąveika. Magnetinė indukcija

Laidininką, kuriuo teka elektros srovė, magnetinis laukas veikia tam tikra jėga. Šios jėgos formulei gauti atlikime šitokį bandymą. Tarp magneto polių padėkime laidininką, kaip parodyta 36.3 paveiksle. Įjungus srovę, laidas staigiai pradės riedėti iš magnetinio lauko arba, atvirkščiai, gilyn į magnetą, žiūrint kokios krypties bus srovė. Nesunku išmatuoti jėgą, reikalingą laidininkui sulaikyti.

Elektromagnetinė jėga

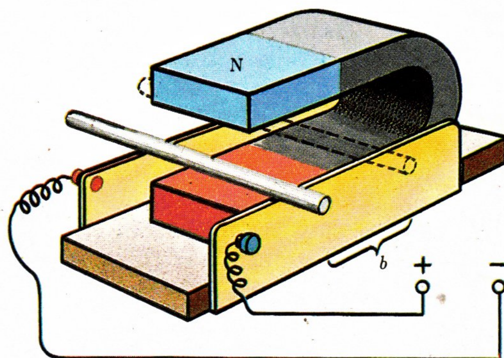
Šią jėgą ištyrė eksperimentais Andrė A m p e r a s ir pavadino **elektromagnetine jėga.** Ji, kaip jau žinome, proporcinga magnetinio lauko stiprumui H ir aplinkos magnetinei skvarbai μ, laidininku tekančios srovės stiprumui I, be to, laidininko dalies, esančios magnetiniame lauke, ilgiui l:

$$F = \mu_0 \mu H I l. \qquad (36.1)$$

Proporcingumo koeficientas μ_0 vadinamas **magnetine konstanta.** Jei formulėje esantys dydžiai išreiškiami SI vienetais, tai konstantos vertė $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2 = $= 1{,}25 \cdot 10^{-6}$ N/A^2.

Magnetinė indukcija

(36.1) formulėje pirmieji trys dauginamieji susiję tik su magnetiniu lauku, o ne su jo veikiamu laidininku. Jų sandauga vadinama lauko magnetine indukcija ir žymima raide B:



36.3 pav.

$$B = \mu_0 \mu H. \qquad (36.2)$$

Vadinasi, kaip stiprumas H apibūdina magnetinio lauko intensyvumą vakuume, taip indukcija B apibūdina jo intensyvumą medžiagoje. Magnetinės indukcijos SI vienetas pavadintas **tesla** (T) serbų fizikui Nikolui T e s l a i (1856—1943) atminti:

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N/A}^2 \cdot 1 \text{ A/m} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}.$$

Magnetinė indukcija — *vektorinis* dydis; jo kryptis sutampa su magnetinio lauko stiprumo kryptimi. Vadinasi, kiekviename lauko taške magnetinės indukcijos vektoriaus kryptis sutampa su einančios per tą tašką magnetinio lauko linijos liestine. Todėl magnetinio lauko linijos dažnai vadinamos *magnetinės indukcijos linijomis.*

36.1. Parašykite formules tiesios srovės, apskritiminės srovės ir ritės magnetinei indukcijai skaičiuoti.

36.2. Apskaičiuokite magnetinio lauko indukciją taške, kuris yra ore 9,2 cm atstumu nuo tiesaus laidininko, kuriuo teka 13,2 A srovė.

?

1. Kodėl geležinis magnetas pakaitinus išsimagnetina?

2. Kaip paaiškinti tą faktą, kad vario magnetinė skvarba mažesnė už vienetą?

3. 36.3 paveiksle parodykite laidininko ilgį l.

36.3. 85 cm ilgio solenoidu, sudarytu iš 750 vijų ir neturinčiu šerdies, teka 5,6 A srovė. Apskaičiuokite magnetinio lauko indukciją solenoido viduje, laikydami jo skersmenį labai mažu palyginti su ilgiu.

36.4. Kokio stiprumo srovė teka 64 cm ilgio solenoidu, sudarytu iš 820 vijų ir neturinčiu šerdies, jeigu magnetinio lauko indukcija jo viduje lygi $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ T? Solenoido skersmuo yra mažas palyginti su ilgiu.

---

37 paskaita

KODĖL SUKASI ELEKTROS VARIKLIS

§ 37.1. Ampero dėsnis

Naudodamiesi magnetinės indukcijos sąvoka, apibūdinta (36.2) lygybe, elektromagnetinės jėgos išraišką (36.1) užrašome paprasčiau:

$$F = BIl. \qquad (37.1)$$

Tačiau ši formulė teisinga tik tada, kai laidininkas statmenas magnetinio lauko linijoms, t. y. statmenas vektoriui **B** — tada elektromagnetinė jėga didžiausia. Kintant kampui α tarp laidininko ir vektoriaus **B,** ši jėga kinta proporcingai $\sin \alpha$ ir tampa lygi nuliui, kai laidininkas lygiagretus lauko linijoms. Todėl bendruoju atveju elektromagnetinė jėga, dažnai vadinama Ampero jėga, išreiškiama formule

$$F = BIl \sin \alpha. \qquad (37.2)$$

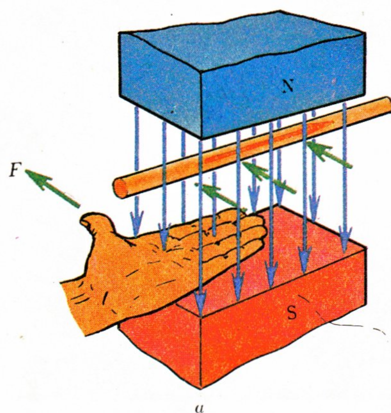
Ši formulė ir yra **Ampero dėsnio** matematinė išraiška.

Ampero jėga pagrįstas elektros variklių, kai kurių matavimo prietaisų veikimas.

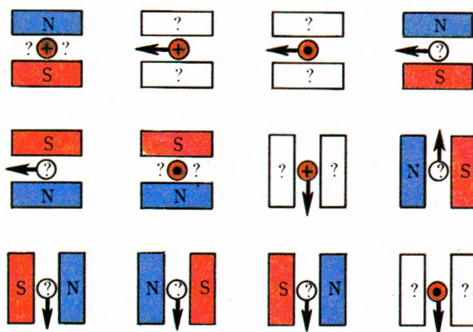
37.1. Vienalyčiame 0,82 T magnetiniame lauke yra tiesus laidininkas, statmenas jėgų linijoms. Jo ilgis 128 cm. Kokia jėga veikia laidininką, kai juo teka 18 A srovė?

Trijų statmenų taisyklė

Elektromagnetinė jėga veikia statmenai laidininkui ir statmenai vektoriui **B,** t. y. statmenai magnetiniam laukui. Jos kryptį galima nustatyti pagal **kairės rankos taisyklę:** *kairę ranką reikia ištiesti taip, kad magnetinės linijos eitų į delną, o ištiesti pirštai rodytų srovės kryptį. Tada atlenktas nykštys rodys laidininką veikiančios jėgos kryptį* (37.1 pav., *a*).



a



b

37.1 pav.

▲ **37.2.** Pritaikę kairės rankos taisyklę, nustatykite 37.1 paveiksle, *b*, nenurodytas kryptis.

§ 37.2. Srovių sąveikos jėga

Žinome, kad lygiagretūs laidai, kuriais teka elektros srovės, vienas kitą traukia arba stumia, nes *kiekvienas laidas yra kito laido srovės kuriamame magnetiniame lauke.*

37.2 paveiksle vaizduojami statmeni brėžiniui laidininkai, kuriais srovė teka link mūsų (pažymėta tašku) ir nuo mūsų (pažymėta kryželiu), ir jų magnetinių laukų (indukcijos B) linijos. Jeigu abu laidininkai yra vienodo ilgio l, tai juos veikia jėgos

$$F_1 = B_2 I_1 l; \qquad F_2 = B_1 I_2 l.$$

Magnetinei indukcijai rasti pasinaudosime (36.2), (35.2) formulėmis ir prisiminsime magnetinės konstantos vertę $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \mathrm{N/A^2}$:

$$B_1 = \mu\mu_0 H_1 = \mu\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{I_1}{r} = \mu\frac{4\pi\cdot 10^{-7}}{2\pi}\cdot\frac{I_1}{r} = 2\cdot 10^{-7}\mu\frac{I_1}{r};$$

analogiškai gauname $B_2 = 2\cdot 10^{-7}\mu\frac{I_2}{r}$.

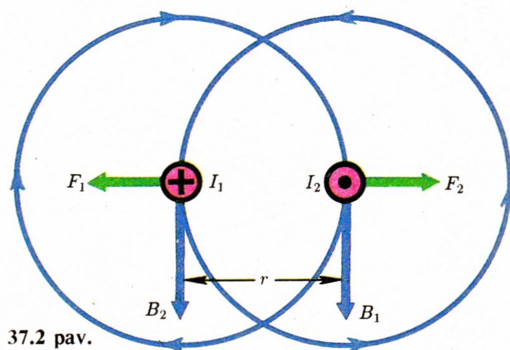
Įrašę šias indukcijų išraiškas į jėgų formules, įsitikinsime, kad abu laidininkus veikia vienodos jėgos $F_1 = F_2 = F$, kurios lygios

$$F = 2\cdot 10^{-7}\mu\frac{I_1 I_2 l}{r}. \qquad (37.3)$$

Srovių sąveikos jėgos vadinamos **elektrodinaminėmis jėgomis.**

Srovės vieneto etalonas

(37.3) formulė garsi tuo, kad būtent ja remiantis nustatomas srovės stiprumo SI vienetas **amperas:** *amperas — tai stiprumas tokios srovės, kuriai tekant dviem lygiagre-*



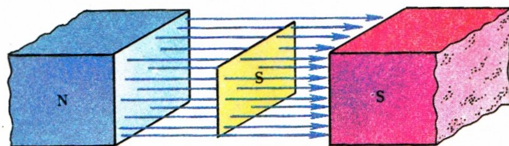
37.2 pav.

čiais laidais, esančiais vakuume 1 m atstumu vienas nuo kito, kiekvieną laido ilgio metrą veikia $2 \cdot 10^{-7}$ *N jėga.*

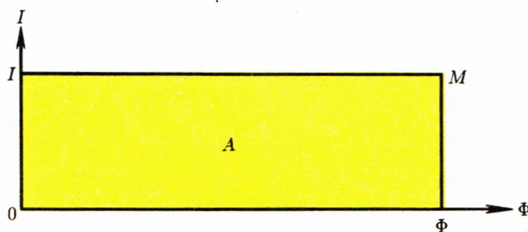
Šiam apibrėžimui patikrinti įrašykime (37.3) formulėje $I_1 = I_2 = I$, $\mu = 1$, $r = 1$ m, $l = 1$ m, $F = 2 \cdot 10^{-7}$ N ir gausime $I = 1$ A. Taigi nurodytomis sąlygomis srovės stiprumas tikrai lygus vienetui.

37.3. Du lygiagretūs 320 cm ilgio laidininkai, kuriais teka vienodo stiprumo srovės, būdami 8,7 cm atstumu vienas nuo kito, traukia vienas kitą $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ N jėga. Kokio stiprumo srovės jais teka?

37.4. Dviem lygiagrečiais laidininkais, esančiais vakuume, teka 100 A srovė. Dėl jų sąveikos 75 cm ilgio atkarpą veikia $5{,}0 \cdot 10^{-2}$ N jėga. Koks yra atstumas tarp tų laidininkų?



37.3 pav.



37.4 pav.

§ 37.3. Magnetinis srautas

Vaizduojant grafiškai magnetinį lauką, indukcijos linijų tankis turi būti proporcingas magnetinės indukcijos (§ 36.2) vertei. Jeigu kurioje nors vienalyčio lauko vietoje indukcija lygi B teslų, tai toje vietoje pro statmeno linijoms vienetinio ploto paviršių galima brėžti, pavyzdžiui, taip pat B linijų. Tuomet pro visą ploto S paviršių eis BS magnetinių linijų. Šitaip gauname naujo fizikinio dydžio **magnetinio srauto** grafinį vaizdą (37.3 pav.). *Magnetinės indukcijos (B) ir jai statmeno paviršiaus ploto (S) sandauga vadinama magnetiniu srautu* (Φ) *pro tą paviršių:*

$$\Phi = BS. \qquad (37.4)$$

Magnetinio srauto SI vienetas vadinamas vėberiu* (Wb):

$$1\ \text{T} \cdot 1\ \text{m}^2 = 1\ \text{T} \cdot \text{m}^2 = 1\ \text{Wb}. \qquad (37.5)$$

Būtent su magnetiniu srautu, kaip vėliau įsitikinsime, susijusi magnetinio lauko energija. Kintant šiam srautui, vyksta energijos virsmas, atliekamas darbas. Todėl magnetinio srauto sąvoka labai svarbi.

Darbas magnetiniame lauke

Žinome, kad laidininką, kuriuo teka srovė, magnetinis laukas veikia jėga $F = BIl$. Jeigu laidininkas pasislinko jėgos kryptimi atstumu b (žr. 37.1 pav.), tai buvo atliktas darbas $A = Fb$, arba $A = BIlb$. Tačiau sandauga $lb = S$ — tai plotas, pro kurį einančias magnetines linijas kirto laidininkas, o sandauga $BS = \Delta\Phi$ — magnetinis srautas, kurį jis kirto. Taigi $A = IBS$, arba

$$A = I\Delta\Phi. \qquad (37.6)$$

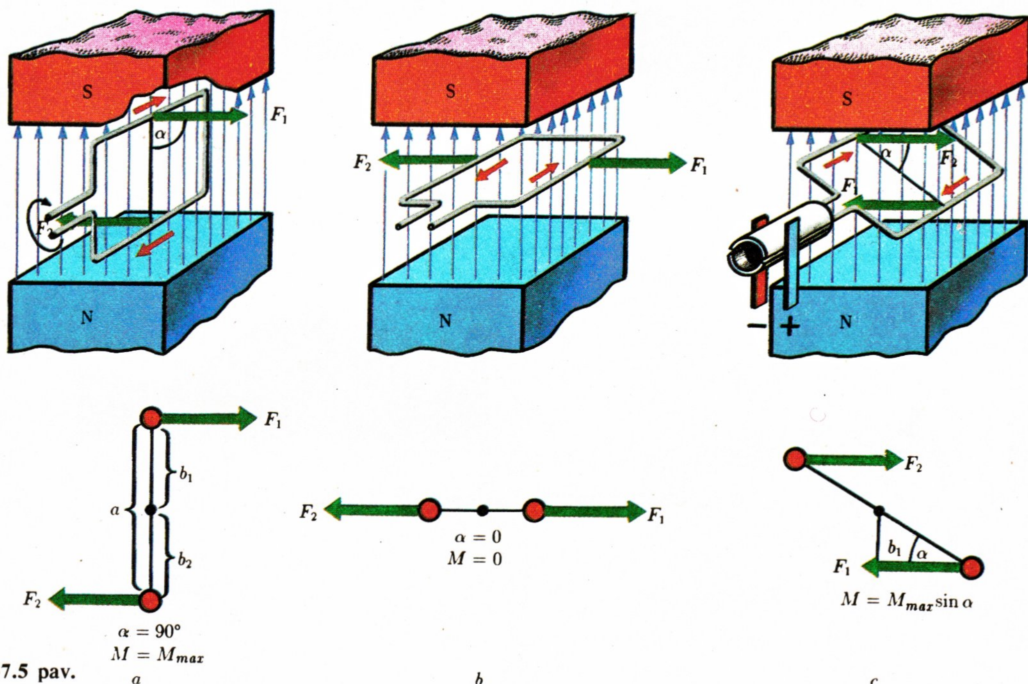
Darbas, atliekamas judant magnetiniame lauke laidininkui, kuriuo teka elektros srovė, yra lygus tos srovės stiprumo ir magnetinio srauto, kurį kerta laidininkas, sandaugai.

37.4 paveiksle šis darbas A grafiškai vaizduojamas stačiakampio $OIM\Phi$ plotu.

37.5. Kokį darbą reikia atlikti, kad 1,2 T indukcijos vienalyčiame magnetiniame lauke esantis

---

* Vilhelmas V ė b e r i s — vokiečių fizikas (1804—1891).



37.5 pav.

0,40 m ilgio laidininkas, kuriuo teka 21 A srovė, paslinktų 0,25 m? Laidininkas juda statmenai lauko jėgų linijoms.

---

§ 37.4. Rėmelio, kuriuo teka srovė, sukimasis magnetiniame lauke

Magnetinis sukimo momentas

Dabar įsivaizduokime, kad magnetiniame lauke yra ne tiesus laidininkas, o laidus rėmelis, kuriuo teka srovė I (37.5 pav., *a*). Rėmelio šoniniais laidininkais srovė teka priešinga kryptimi, todėl juos veikia lygiagrečios priešingų krypčių jėgos F_1 ir F_2, sudarančios jėgų dvejetą (37.5 pav.). Kiekvienos jėgos modulis $F_1 = F_2 = BIl$ (čia l — rėmelio ilgis). Jėgų dvejetas sudarys magnetinį sukimo momentą M ir suks rėmelį, kol jo plokštuma pasidarys statmena lauko linijoms (37.5 pav., *b*).

Kaip žinome iš mechanikos, sukimo momentas yra lygus jėgos F ir jos peties b sandaugai: $M = Fb$. Dviejų rėmelį veikiančių jėgų atstojamasis sukimo momentas $M = F_1b_1 + F_2b_2$. Didžiausias sukimo momentas M_{max} bus tada, kai rėmelio plokštuma lygiagreti magnetinio lauko linijoms (37.5 pav., *a*). Paveiksle matome, kad jėgų pečiai $b_1 = b_2 = \frac{a}{2}$. Todėl momentas $M_{max} = IBl\frac{a}{2} + IBl\frac{a}{2} = IBla$.

$$M_{max} = IBla. \quad (37.7)$$

Kadangi sandauga $la = S$ yra rėmelio plotas, o sandauga $BS = \Phi$ — rėmelį veriantis magnetinis srautas, tai (37.7) formulę galime rašyti paprasčiau:

$$M_{max} = I\Phi. \quad (37.8)$$

Kai rėmelio plokštuma su jėgos veikimo kryptimi sudaro kampą α, jėgos petys sutrumpėja proporcingai $\sin \alpha$ (37.5 pav., *c*), taip pat sumažėja ir sukimo momentas. Taigi rėmelio sukimo momentas, priklausomai nuo orientacijos magnetiniame lauke, kinta sinuso dėsniu:

$$M = M_{max} \sin \alpha, \quad (37.9)$$

arba

$$M = I\Phi \sin \alpha. \quad (37.10)$$

Pirmas žingsnis link elektros variklio

Jeigu besisukantis rėmelis iš inercijos praeis pro pusiausvyros padėtį (37.5 pav., *b*), tai magnetinių jėgų dvejetas ims jį sukti atgal link tos padėties. Norint, kad rėmelis nuolatos suktųsi į vieną pusę, reikia tais momentais, kai rėmelis praeina „mirties tašką", pakeisti jame srovės kryptį — tada susidarys momentas, toliau sukantis rėmelį ta pačia kryptimi (37.5 pav., *c*).

Taigi, įtaisę rėmelį ant ašies su guoliais ir pritvirtinę galuose pusžiedžius srovei tiekti į besisukantį rėmelį pro slystančius kontaktus, turėsime tikro elektros variklio modelį.

Rėmelių, kuriais teka srovė, sukimasis magnetiniame lauke pritaikomas ne vien elektros varikliuose, bet ir daugelyje matavimo prietaisų, garsiakalbiuose bei kitur.

? *1. Kaip nustatyti nežinomus pasagos pavidalo magneto polius, pasitelkus... televizorių?*

37.6. Koks magnetinis srautas veria 280 cm^2 ploto plokščią paviršių, statmeną jėgų linijoms, ore vienalyčiame magnetiniame lauke, kurio stiprumas 250 A/m?

37.7. 1,6 m ilgio solenoidą sudaro 1400 vijų, kurių spindulys 4,8 cm. Šerdies nėra. Koks magnetinis srautas veria tą solenoidą, tekant juo 6,3 A stiprumo srovei?

---

38 paskaita

KUO GARSUS TUMASONIŲ KAIMAS?

§ 38.1. Magnetinio lauko ir judančio krūvio sąveika

Ampero dėsnis (§ 35.1) 1820 m. buvo paskelbtas kaip eksperimentinis faktas. Galinčios jį paaiškinti elektroninės teorijos tuo metu dar nebuvo. Tik po 75 metų olandų fizikas Hendrikas L o r e n c a s (1853—1928) iškėlė mintį, kad Ampero jėga, kuria magnetinis laukas veikia laidininką, kai juo teka srovė, iš tikrųjų veikia ne patį laidininką, o juo judančias elektringas daleles. Dalelės, judėdamos ir susidurdamos su medžiagos atomais, patraukia su savimi visą laidininką.

Lorenco jėgos formulė

Ampero jėgą F_A padalijęs iš metaliniame laidininke judančių elektronų skaičiaus N, Lorencas apskaičiavo jėgą, kuria magnetinis laukas veikia vieną elektroną, turintį elementarųjį krūvį e. Pagerbiant elektroninės medžiagų sandaros teorijos kūrėją H. Lorencą, ši jėga buvo pavadinta **Lorenco jėga.** Ją žymėsime F_L:

$$F_L = \frac{F_A}{N}. \quad (38.1)$$

Žinoma, kad $F_A = IBl \sin \alpha$ (37.2). Srovės stiprumas $I = q/t$. Jeigu laidininko atkarpoje l yra N elektronų, tai krūvis $q = Ne$. Elektronams judant greičiu v, laikas t, per kurį prateka krūvis q, yra lygus $t = l/v$. Įrašę visa tai į (38.1) ir suprastinę gausime:

$$F_L = Bev \sin \alpha. \quad (38.2)$$

Kampas α, kurį § 37.2 matavome tarp magnetinio lauko linijų ir laidininko, tiksliau sakant, yra kampas tarp magnetinės indukcijos vektoriaus ir elektrono greičio vektoriaus. Ši formulė taikoma bet kokiai magnetiniame lauke judančiai elektringai dalelei.

Iš Lorenco jėgos formulės išplaukia šios išvados:

1. Nejudančio elektros krūvio ($v = 0$) magnetinis laukas visiškai neveikia: $F_L = 0$.

2. Jeigu dalelė juda išilgai lauko linijų ($\alpha = 0$), tai Lorenco jėga taip pat lygi nuliui.

3. Didžiausia jėga laukas veikia dalelę tada, kai pastaroji juda statmenai lauko linijoms ($\alpha = 90°$, $\sin \alpha = 1$).

Vėl kairės rankos taisyklė

Dalelę veikiančios Lorenco jėgos kryptis, kaip ir Ampero jėgos kryptis, randama pagal jau žinomą kairės rankos taisyklę (§ 37.1): *kairę ranką reikia ištiesti taip, kad magnetinės linijos eitų į delną, o pirštai rodytų dalelės greičio kryptį. Tada atlenktas nykštys rodys teigiamą dalelę veikiančios jėgos kryptį.* Neigiamo krūvio dalelę veiks priešingos krypties Lorenco jėga.

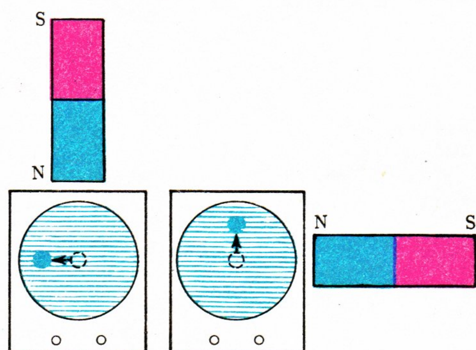
Lorenco jėgą galima pademonstruoti elektroniniu vamzdžiu. Priartinę magnetą prie veikiančio oscilografo ekrano, matysime, kad šviečiantis taškas ekrane paslenka (38.1 pav.). Priartinus kitą magneto galą, taškas paslenka į priešingą pusę.

Dalelės ciklotroninis spindulys

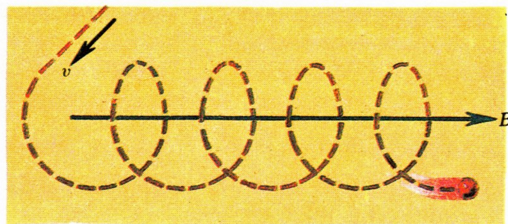
Sakykime, elektringa dalelė įlėkė į magnetinį lauką statmenai jo linijoms. Lorenco jėga visuomet statmena dalelės greičiui. Tokia jėga nekeičia greičio didumo, o keičia tik greičio kryptį — suteikia dalelei įcentrinį pagreitį, verčia ją judėti apskritimu. Žinome iš mechanikos, kad įcentrinis pagreitis $a_{įc} = \frac{v^2}{R}$. Jei jį suteikia Lorenco jėga, tai, remiantis antruoju Niutono dėsniu,

$$a_{įc} = \frac{F_L}{m} = \frac{qvB}{m}. \text{ Todėl } \frac{qvB}{m} = \frac{v^2}{R};$$

iš čia apskritimo, kuriuo juda dalelė, spindulys



38.1 pav.



38.2 pav.

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (38.3)$$

Dalelės sukimosi magnetiniame lauke spindulys R vadinamas **ciklotroniniu spinduliu**, nes tokio spindulio lanku dalelės juda specialiuose greitintuvuose **ciklotronuose.**

Analizuodami 38.3 formulę, matome, kad, kuo didesnė dalelės masė arba greitis, tuo didesnis trajektorijos kreivumo spindulys — magnetinis laukas mažiau iškreipia dalelės trajektoriją. Kita vertus, kuo didesnis dalelės krūvis arba magnetinio lauko indukcija, tuo kreivumo spindulys mažesnis, magnetinis laukas labiau iškreipia dalelės trajektoriją.

Sudėtingas dalelės judėjimas

Jeigu, dalelei įlekiant į magnetinį lauką, greičio kryptis sudarys su linijų kryptimi kampą α, tai ji ne tik pradės suktis, bet kartu ir

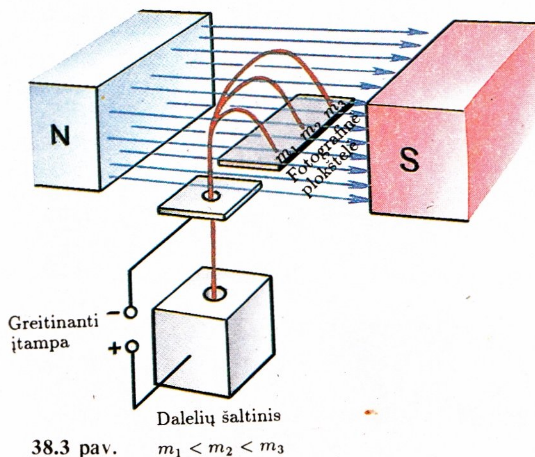
judės išilgai magnetinių linijų — vadinasi, ji judės spirale (38.2 pav.). Dalelės slenkamojo judėjimo išilgai magnetinių linijų greitis $v_{sl} = v \cos \alpha$.

Lorenco jėgos praktinis pritaikymas

Kaip rodo (38.3) formulė, judančios magnetiniame lauke dalelės nukrypimas nuo tiesaus kelio priklauso ir nuo jos masės. Tuo remiantis labai tiksliai nustatomos elektringų dalelių masės. Šiam tikslui skirtas prietaisas vadinamas **masių spektrografu.** Jo schemą matome 38.3 paveiksle. Eksperimento metu išmatavus dydžius R, B ir v, apskaičiuojama dalelės masė.

Masių spektrografu atskiriami ir ištiriami izotopai, juo buvo nustatyta elektrono ir protono masė. Tai — nepakeičiamas pagalbininkas branduoliniuose tyrimuose.

Lorenco jėgos veikimu pagrįsta ir ciklotrono konstrukcija. Tai — prietaisas, skirtas elektringoms dalelėms įgreitinti iki didelių energijų, reikalingų branduolinėms reakcijoms sukelti. Dalelės skrieja ciklotrono magnetiniame lauke spiraline trajektorija, nes, didėjant greičiui, didėja ir trajektorijos spindulys. Įgijusios reikiamą energiją dalelės nukreipiamos į tiriamą objektą.



38.3 pav. $m_1 < m_2 < m_3$

Naudodamiesi ciklotronais ir sudėtingesnių konstrukcijų greitintuvais sinchrociklotronais, sinchrofazotronais, fizikai prasiskverbia į materijos gelmes ir tiria nuostabų elementariųjų dalelių pasaulį.

Lorenco jėga valdo dalelių judėjimą MPD generatoriuose (§ 31.4), elektroniniuose vamzdžiuose (§ 32.4), elektroniniuose mikroskopuose ir daugelyje kitų šiuolaikinių prietaisų.

38.1. Į vienalytį 0,085 T indukcijos magnetinį lauką įlekia elektronas $4{,}6 \cdot 10^7$ m/s greičiu statmenai jėgų linijoms. Apskaičiuokite, kokia jėga veikia elektroną magnetiniame lauke ir kokio spindulio lanku jis juda.

---

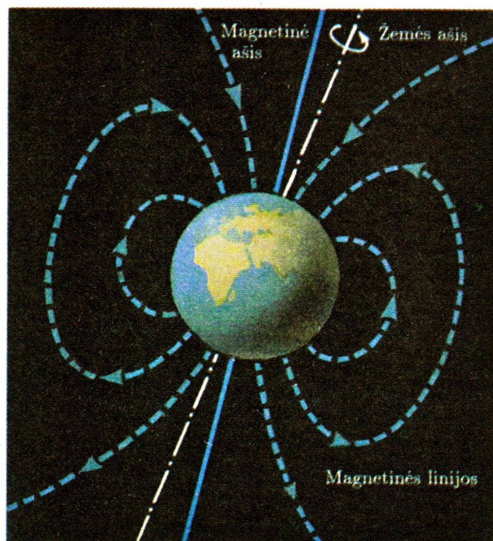
§ 38.2. Žemės magnetinis laukas

Žemės rutulys veikia magnetinę rodyklę. Tai rodo, kad Žemę supa magnetinis laukas — geomagnetinis laukas. Žemės magnetizmo priežastys dar neišaiškintos. Spėjama, kad jį lemia sudėtingi procesai, vykstantys skystame ir elektrai laidžiame Žemės branduolyje.

Žemės magnetinio lauko poliai yra netoli nuo geografinių Žemės ašigalių, bet su jais nesutampa. Žemės šiaurėje yra magnetinis pietų polius, o pietuose — šiaurės polius (38.4 pav.). Per Žemės magnetinius polius išvesti apskritimai vadinami **magnetiniais dienovidiniais**, arba **magnetiniais meridianais.** Magnetinio dienovidinio kryptimi nusistovi magnetinė rodyklė.

Geomagnetinio lauko parametrai

Kampas tarp geografinio ir magnetinio dienovidinių bet kuriame Žemės paviršiaus taške vadinamas **magnetine deklinacija.** Vilniuje magnetinė deklinacija yra 1° į rytus. Taigi kompasas tik apytiksliai rodo šiaurės—pietų kryptį.



38.4 pav.

38.4 paveiksle matome, kad Žemės magnetinio lauko linijos nelygiagrečios žemės paviršiui. Jeigu magnetinė rodyklė įtaisyta taip, kad gali laisvai suktis dar ir apie horizontalią ašį, tai jos šiaurės polius nukrypsta žemyn (38.5 pav.). Tai suprantama — rodyklė šiuo atveju rodo jau ne dienovidinio, o tiesiog magnetinės linijos kryptį. Magnetinės rodyklės nuokrypio nuo horizontalios plokštumos kampas vadinamas **magnetine inklinacija.** Magnetiniame pusiaujyje inklinacija lygi 0°, magnetiniuose poliuose — 90° (rodyklė statmena horizonto plokštumai). Vilniuje magnetinė inklinacija lygi 68°28′.

Žemės magnetinio lauko stiprumas, magnetinė deklinacija ir inklinacija vadinami **Žemės magnetinio lauko elementais.**

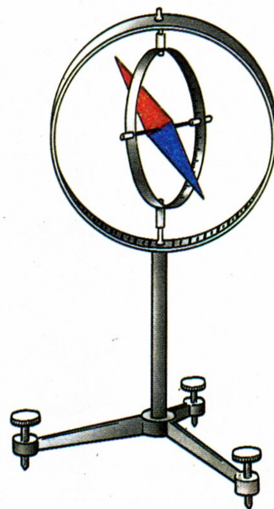
Šių elementų vertės įvairiose Žemės paviršiaus vietose atsispindi **magnetiniuose žemėlapiuose.** Magnetiniai žemėlapiai vartojami jūrų ir oro navigacijoje, geologijoje, ieškant naudingųjų iškasenų. Lietuvos magnetinį žemėlapį pradėjo sudarinėti 1930 m. akad. Povilas B r a z d ž i ū n a s.

Magnetinio lauko sutrikimai

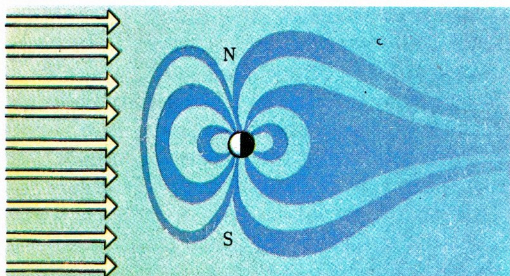
Tiriant geomagnetinį lauką, žemės paviršiuje aptinkama vietų, kur magnetinė rodyklė visą laiką būna nukrypusi nuo tai vietai normalios krypties. Jos vadinamos **magnetinės anomalijos sritimis.** Pavyzdžiui, žinomos didelės Rytų Sibiro, Rytų Europos, Brazilijos, Kursko srities ir kitos anomalijos, kurių priežastis — palyginti negiliai slūgsantys milžiniški geležies rūdos klodai.

1936 m. Kauno universiteto profesorius K. S l e ž e v i č i u s (1890—1953), atlikdamas tyrimus Lietuvos magnetiniam žemėlapiui sudaryti, Tumasonių (Rokiškio raj.) kaimo apylinkėje aptiko didžiausią Pabaltijyje magnetinę anomaliją. Šią anomaliją sukelia požeminės geležingos uolienos.

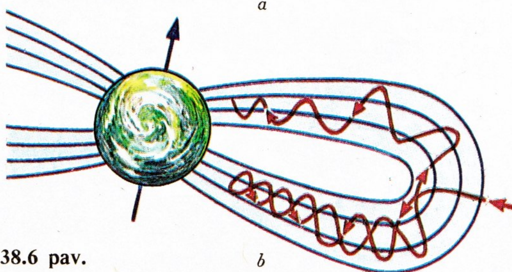
Netaisyklingi trumpalaikiai Žemės magnetinio lauko sutrikimai vadinami **magnetinėmis audromis.** Magnetinės audros susijusios su Saulės aktyvumo padidėjimu. Jos suintensyvina poliarines pašvaistes, pablogina trumpabangį radijo ryšį, sukelia ciklonus troposferoje.



38.5 pav.



a



b

38.6 pav.

Saulės vėjo padariniai

Ilgą laiką buvo spėjama, kad geomagnetinis laukas panašus į tiesaus magneto lauką: išėjusios iš Žemės gelmių magnetinės linijos nutolsta kosminėje erdvėje tūkstančius kilometrų ir grįžta į Žemę kitame jos pusrutulyje (38.4 pav.). Tačiau 1958 m. kosminiai tyrimai parodė, kad Žemės magnetinis laukas nėra simetriškas. Jį deformuoja Saulės skleidžiamas greitų elektringų dalelių (protonų ir elektronų) srautas, pavadintas **Saulės vėju.** Judančių dalelių kuriamiems magnetiniams laukams sumuojantis su Žemės magnetiniu lauku, pastarasis Saulės pusėje tarsi susispaudžia, o priešingoje pusėje ištįsta (38.6 pav., *a*), tarsi būtų „nupučiamas". Žemės rutulį supanti erdvė, kurioje pasireiškia geomagnetinis laukas, vadinama **magnetosfera.**

Žemės šarvas nuo Saulės vėjo

Jau pirmaisiais dirbtiniais Žemės palydovais buvo nustatyta, kad kosminėje erdvėje link Žemę yra sritys, kuriose susitelkusios daugybė elektringų dalelių. Tai paaiškinama Žemės magnetinio lauko poveikiu: elektringas daleles, skriejančias iš kosmoso link Žemės, „pagauna" Žemės magnetinis laukas, ir jos ima skrieti spiralėmis apie magnetines linijas (38.6 pav., *b*). Dėl to jos susikaupia tam tikrose srityse — vadinamosiose **radiacijos juostose.** Žemę supa dvi radiacijos juostos, sudarančios papildomą pavojų kosminiams skrydžiams: vidinė — 2400 km aukštyje ir išorinė — 12 000 km aukštyje (žr. 38.6 pav., *a*). Radiacijos juostoje esančių dalelių energija lygi 10^{15}—10^{16} J. Maždaug tiek energijos išsiskiria sprogstant branduolinei bombai. Taigi Žemės magnetinis laukas, tarsi gigantiška skraistė, saugo gyvybę Žemėje nuo pražūtingo kosminio spinduliavimo.

Ar reikalingas kompasas Mėnulyje?

Tarptautinių kosminių stočių ir kosminių laivų atlikti tyrinėjimai rodo, kad magnetinį lauką turi ir kitos planetos — Jupiteris, Saturnas, Merkurijus, Marsas. Mėnulis ir Venera neturi magnetinio lauko, todėl apie juos neaptikta nei radiacijos juostų. Saulės magnetinis laukas dvigubai stipresnis negu Žemės.

Labiausiai įmagnetinti kūnai Visatoje yra žvaigždės, vadinamos pulsarais. Magnetinė indukcija jų aplinkoje siekia 1000 MT.

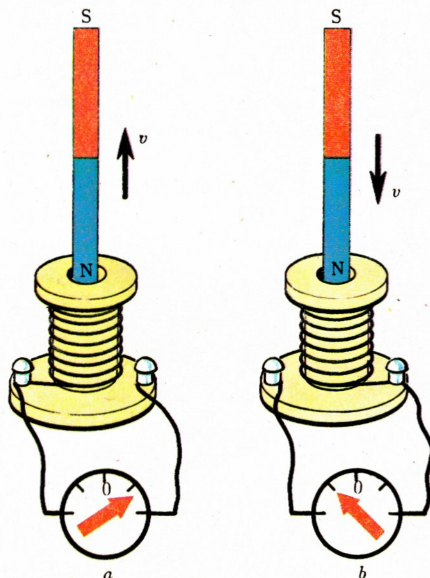
Ar turi gervė kompasą?

Žemės magnetinis laukas padeda gyviems organizmams orientuotis erdvėje, suvokti laiką, rasti kelią migruojantiems paukščiams ir žuvims. Kai kurių augalų šaknų sistema išsidėsto išilgai Žemės magnetinių linijų. Ilgą laiką dirbtinai susilpnintas Žemės magnetinis laukas daro neigiamą įtaką gyvūnų ir augalų gyvybinei veiklai. Todėl magnetiniais reiškiniais domisi ne vien fizikai, bet ir biologai, ornitologai, geologai, agronomai, medikai.

? *1. 38.2 paveiksle parodytam spindulio nukrypimui pritaikykite kairės rankos taisyklę ir nustatykite dalelių krūvio ženklą.*
2. Sėjant javus, taip, kad eilės būtų statmenos Žemės magnetinio lauko krypčiai, gaunamas didesnis derlius. Kodėl?

38.2. Elektronas juda vienalyčiame magnetiniame lauke vakuume statmenai jėgų linijoms 10 cm spindulio apskritimu. Koks yra jo judėjimo greitis, jeigu lauko stiprumas $1{,}6 \cdot 10^2$ A/m?

38.3. Elektronas juda vakuume vienalyčiame 75 A/m stiprumo magnetiniame lauke, ir jo greičio vektorius sudaro su lauko kryptimi 30° kampą. Koks yra elektrono trajektorijos vijų spindulys ir kokį atstumą elektronas nulekia išilgai jėgų linijų, kol apsisuka apie jas 3 kartus, jei jo greitis $2{,}5 \cdot 10^6$ m/s?



39.1 pav.

3.2 skyrius
ELEKTROMAGNETINĖ INDUKCIJA

„Niekada nuo Galilėjaus laikų pasaulis nematė šitiek nuostabių ir skirtingų atradimų, išplaukusių iš vienos galvos, ir vargu ar greitai pamatys kitą Faradėjų...“

A. Stoletovas

39 paskaita
ELEKTROS EROS PRADŽIA

§ 39.1. Elektromagnetinės indukcijos reiškinys

Genialus Faradėjaus atradimas

Didysis anglų fizikas M. Faradėjus užsibrėžė tikslą „magnetizmą paversti elektra“. Jeigu elektros srovė gali įmagnetinti geležį, samprotavo Faradėjus, tai ir magnetas, savo ruožtu, turi sukurti elektros srovę. Tačiau šiam tikslui įgyvendinti prireikė dešimties metų įtempto darbo. Faradėjus ir kiti to meto fizikai nesuprato svarbiausio: srovę gali sukelti tik magnetinio lauko kitimas. Bandymus sunkino ir ta aplinkybė, kad nebuvo pakankamai jautrių galvanometrų, Faradėjui juos teko sukonstruoti ir pagaminti pačiam. Tik 1831 m. mokslininko pastangas vainikavo sėkmė. Faradėjus ištyrė, kad srovė ritėje atsiranda tuo momentu, kai į ją kišamas arba iš jos traukiamas magnetas (39.1 pav., *a, b*); kai ritė juda atžvilgiu nejudančio magneto arba kitos ritės, kuria teka srovė; kai kinta tekančios antrąja rite srovės stiprumas. Visais šiais atvejais kinta veriantis tiriamąją ritę magnetinis srautas.

Elektros srovės atsiradimas uždarame laidininke, kintant jį veriančiam magnetiniam srautui, vadinamas **elektromagnetinė indukcija.** Indukcijos būdu gauta srovė

vadinama **indukuotąja srove,** o verčianti ją tekėti elektrovaros jėga — **indukcine EVJ.**

Kaip aiškina indukcinės EVJ atsiradimą elektroninė teorija? Judant laidininkui, kartu juda ir jame esantys laisvieji elektronai. Magnetiniame lauke judančius elektronus veikia Lorenco jėga, kuri juos nukreipia išilgai laidininko. Elektronai kaupiasi viename laidininko gale, o priešingame gale susidaro jų trūkumas. Tarp laidininko galų susidaro potencialų skirtumas — indukcinė EVJ.

Indukcinės EVJ formulė

Indukcinė EVJ (žr. § 26.1) yra lygi darbui, kurį atlieka Lorenco jėga perkeldama vienetinį krūvį nuotoliu, lygiu laidininko ilgiui l:

$$E = \frac{F_L \cdot l}{q} = \frac{qBv \sin \alpha \cdot l}{q};$$

$$E = Blv \sin \alpha. \qquad (39.1)$$

Matome, kad indukcinės EVJ didumas priklauso nuo magnetinio lauko indukcijos, laidininko ilgio, jo judėjimo greičio ir kampo tarp magnetinių linijų ir laidininko judėjimo krypčių.

Faradėjaus atradimo reikšmė

Faradėjaus atradimas atvėrė kelią „didžiajai elektrai", parodė būdą mechaninei energijai paversti elektros energija. Elektromagnetinės indukcijos reiškiniu pagrįstas galingų srovės šaltinių **generatorių** veikimas. Visa šiuolaikinė elektrifikacija — tai elektromagnetinės indukcijos reiškinio praktinis pritaikymas.

Pats Faradėjus nenumatė, kad jo atradimas taip pakeis visą Žemės veidą. Kalbama, kad paklaustas, kokios naudos galima tikėtis iš elektromagnetinės indukcijos atradimo, Faradėjus atsakė: „Kokia nauda gali būti iš naujagimio?"

39.1. Tiesus laidininkas juda 25 m/s greičiu 0,0038 T indukcijos vienalyčiame lauke statmenai jėgų linijoms. Kokio ilgio yra tas laidininkas, jei tarp jo galų indukuojasi 28 mV įtampa?

39.2. Tiesus 120 cm ilgio laidininkas juda vienalyčiame magnetiniame lauke. Jo greitis, lygus 15 m/s, sudaro su jėgų linijomis 17° kampą. Kokia yra lauko indukcija, jei laidininke indukuojasi 6,2 mV EVJ?

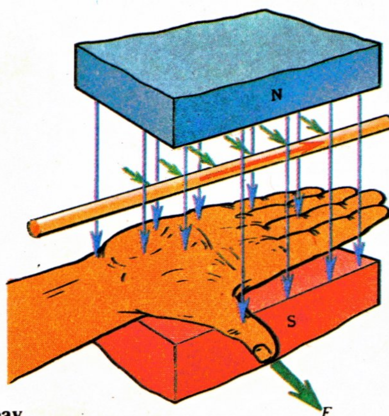
§ 39.2. Indukuotosios srovės kryptis. Lenco taisyklė

Dešinės rankos taisyklė

Judant magnetiniame lauke tiesiam laidininkui, indukuotoji srovė teka ta kryptimi, kuria veikia Lorenco jėga teigiamą krūvį. Nesunku suvokti, kad srovės krypčiai rasti galima taikyti šią **dešinės rankos taisyklę:** *dešinę ranką reikia ištiesti taip, kad magnetinio lauko linijos eitų į delną, o atlenktas nykštys rodytų laidininko judėjimą sukeliančios jėgos kryptį. Tada ištiesti pirštai rodys indukuotosios srovės kryptį* (39.2 pav.).

Painoka, bet svarbi taisyklė

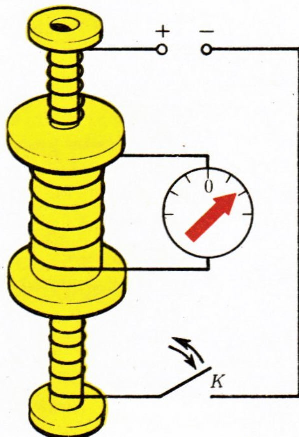
Srovė gali indukuotis ir nesant mechaninio judėjimo. Pavyzdžiui, įjungiant arba išjun-



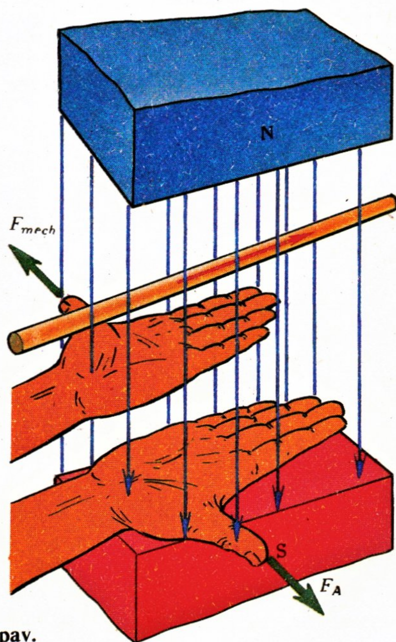
39.2 pav.

giant srovę vidinėje ritėje (39.3 pav.), išorinėje ritėje indukuojasi srovė, nes atsiranda arba išnyksta magnetinis laukas. Universalią taisyklę indukuotosios srovės krypčiai nustatyti suformulavo Peterburgo akademikas Emilis Lencas (1804—1865): *indukuotoji srovė visuomet teka tokia kryptimi, kad jos magnetinis laukas priešintųsi tam magnetinio lauko kitimui, dėl kurio ji atsirado, t. y. priešintųsi savo atsiradimo priežasčiai.* Šį teiginį galima vaizdžiai pademonstruoti, pritaikius tam pačiam laidininkui ir dešinės, ir kairės rankos taisykles. 39.4 paveiksle sujungti 37.1 ir 39.2 paveikslai. Laidininkas juda veikiamas mechaninės jėgos F_{mech}, kurios kryptį rodo dešinės rankos nykštys; jame indukuojasi srovė, kurios kryptį rodo ištiesti dešinės rankos pirštai. Pritaikę indukuotai srovei kairės rankos taisyklę, pamatysime, kad ją veikia priešingos krypties Ampero jėga F_A. Ši jėga atsiranda todėl, kad indukuotoji srovė kuria savo magnetinį lauką, ir priešinasi laidininko judėjimui išoriniame magnetiniame lauke.

Lenco taisyklė dar kartą patvirtina energijos tvermės dėsnį.



39.3 pav.



39.4 pav.

§ 39.3. Faradėjaus elektromagnetinės indukcijos dėsnis

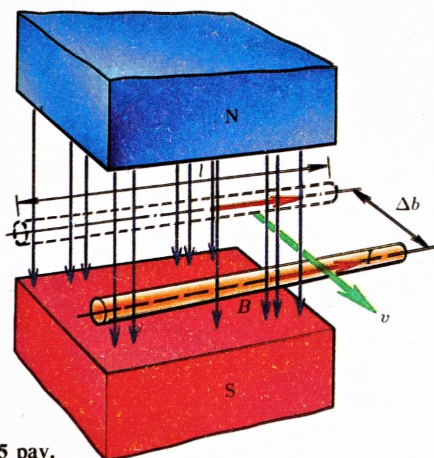
Ištyręs elektromagnetinės indukcijos atsiradimo sąlygas, Faradėjus nustatė bendriausią indukcinės EVJ atsiradimo laidininke priežastį — **magnetinio srauto kitimą.**

Sakykime, laidininkas juda statmenai magnetinio lauko linijoms greičiu $v=\frac{\Delta b}{\Delta t}$ (39.5 pav.). Tada jame indukuojasi EVJ, išreiškiama (39.1) formule:

$$E=Bl\frac{\Delta b}{\Delta t}.$$

Tačiau $l\cdot\Delta b=\Delta S$, — tai judančio laidininko nubrėžtas plotas, o $B\cdot\Delta S=\Delta\Phi$ — jo kirstas magnetinis srautas.

Pritaikę Lenco taisyklę, įsitikintume, kad indukcinė EVJ būna teigiamos krypties tada, kai magnetinio srauto pokytis $\Delta\Phi$ — neigiamo ženklo (pvz., uždarą kontūrą veriantis srautas mažėja), ir atvirkščiai.



39.5 pav.

Todėl apibendrindami galime rašyti:

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (39.2)$$

Indukcinė elektrovaros jėga yra tiesiog proporcinga laidininką arba kontūrą veriančio magnetinio srauto kitimo greičiui. Šį dėsnį ir vadiname **Faradėjaus dėsniu.**

Jeigu kinta magnetinis srautas ritėje, turinčioje n vijų, tai visa joje indukuojama EVJ n kartų didesnė:

$$E = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (39.3)$$

39.3. Magnetiniame lauke yra rėmelis, sudarytas iš 25 vijų. Kokia EVJ jame indukuojasi, kai magnetinis srautas pakinta per 0,16 s nuo 0,098 iki 0,013 Wb?

39.4. 4,8 cm spindulio metalinis žiedas yra 0,012 T indukcijos magnetiniame lauke orientuotas statmenai jėgų linijoms. Žiedui pašalinti iš lauko prireikė 0,025 s. Kokia vidutinė EVJ tada indukavosi žiede?

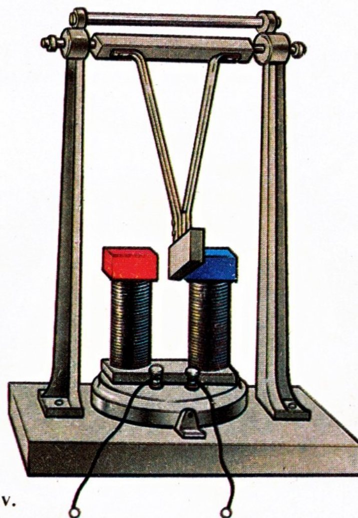
---

§ 39.4. Sūkurinės srovės

Kintant magnetiniam srautui, kertančiam bet kurią elektrai laidžią medžiagą, indukuojasi srovė. Tačiau elektros mašinose (generatoriuose, varikliuose ir kt.) magnetiniai srautai veria ne tik apvijas, bet ir kitas dalis — elektromagnetų šerdis, inkarus, korpusus. Masyviuose metaliniuose kūnuose indukuotos srovės teka trumpais uždarais kontūrais ir gali būti gana stiprios. Šios srovės buvo pavadintos **sūkurinėmis** arba **Fuko srovėmis** jas ištyrusio prancūzų mokslininko Žano F u k o (1819—1868) garbei. Sūkurinės srovės kaitina elektros generatorių, variklių, transformatorių plienines dalis. Siekiant sumažinti žalingą poveikį, elektros mašinų plieninės dalys, kurias veikia kintami magnetiniai laukai, daromos iš atskirų plonų lakštų, izoliuotų vienas nuo kito laku, popieriumi arba to paties metalo oksidu.

Blogis išeina į gerą

Jeigu masyvus laidininkas juda magnetiniame lauke, tai, pagal Lenco taisyklę, sūkurinių srovių magnetiniai laukai jį turi stabdyti. Magnetiniame lauke judančių metalinių kūnų greitis mažėja, tartum jie judėtų klampia aplinka. Varinė plokštelė, pakabinta tarp elektromagneto polių, nustoja svyravusi,


39.6 pav.

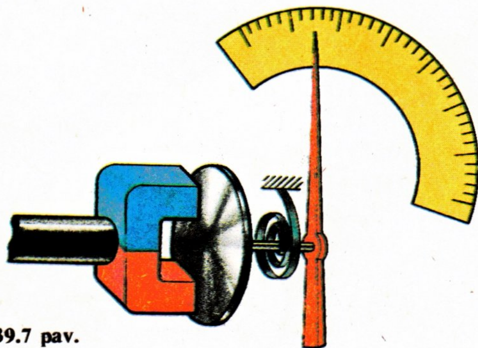
kai tik elektromagnete įjungiama srovė (39.6 pav.). Stabdymas sūkurinėmis srovėmis taikomas elektros skaitiklių disko sukimuisi lėtinti, matavimo prietaisų rodyklių virpesiams slopinti ir daug kur kitur.

Jeigu prieš aliumininį diską suksime pasaginį magnetą (39.7 pav.), tai diske indukuosis sūkurinės srovės, kurių magnetiniai laukai priešinsis magneto ir disko judėjimui vienas kito atžvilgiu. Ši sąveika trauks diską paskui magnetą, todėl suks diską ir su juo sujungtą rodyklę. Diskas pasisuks tokiu kampu, kad magnetinį sukimo momentą atsvertų įtempta spyruoklė. Šis posūkio kampas proporcingas magneto sukimosi greičiui. Tokiu principu veikia **spidometrai** — prietaisai motociklų ir automašinų greičiui matuoti. Mašinos kardaninio veleno sukimasis perduodamas į prietaisų skydą lanksčiu plieniniu troseliu, kuris suka spidometro magnetą.

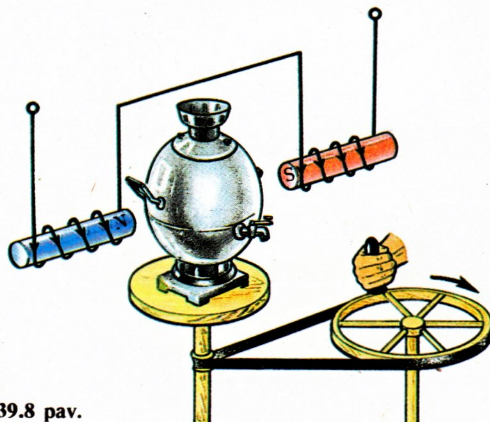
Elektrometalurgijoje indukcinėse krosnyse sūkurinės srovės lydo metalą ir grūdina plieną.

Simas Klaidelė pademonstravo „magnetodinaminį" virdulį (39.8 pav.). Greitai sukant storasienį varinį indą tarp stipraus magneto polių, vanduo virdulyje užvirė. Kodėl neatsirado norinčių pakartoti eksperimentą?

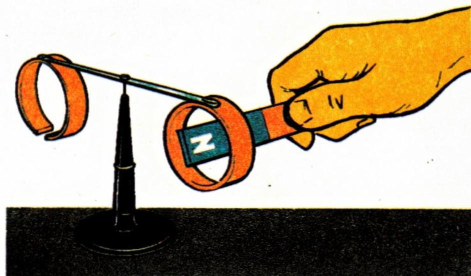
? *1. Kas buvo sukurtas pirmiau — elektros variklis ar indukcinis generatorius?*



39.7 pav.



39.8 pav.



39.9 pav.

2. Kišant magnetą į laisvai kabantį aliumininį žiedą (39.9 pav.), jis traukiasi nuo magneto, o perpjautas žiedas nereaguoja į magneto judėjimą. Kodėl?

3. Kodėl, rėmeliui tolygiai slenkant vienalyčiame magnetiniame lauke, nesiindukuoja EVJ?

4. Kurioje skalės pusėje bus nulinė padala, spidometro trosui sukantis taip, kaip parodyta 39.7 paveiksle?

39.5. Kai ritę veriantis magnetinis srautas pakinta nuo 0,024 iki 0,056 Wb per 0,32 s, joje indukuojasi 10 V vidutinė EVJ. Kiek vijų yra toje ritėje?

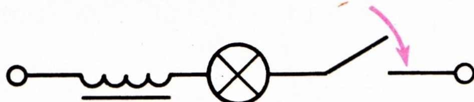
39.6. Tiesus 86 cm ilgio laidininkas juda 14 m/s greičiu vienalyčiame magnetiniame lauke, kurio indukcija 0,025 T. Kokį kampą sudaro lauko indukcijos ir greičio vektoriai, jei tame laidininke indukuojasi 0,12 V EVJ?

40 paskaita
AR TURI ELEKTRA INERCIJOS?

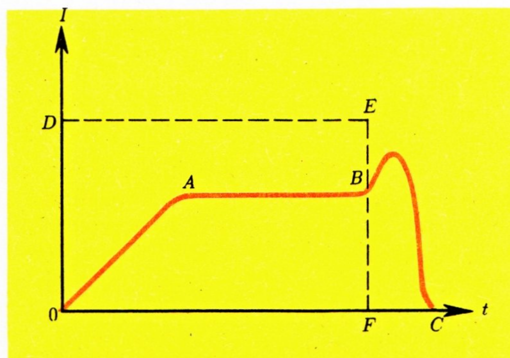
§ 40.1. Saviindukcijos reiškinys

Ypatingas indukcijos atvejis

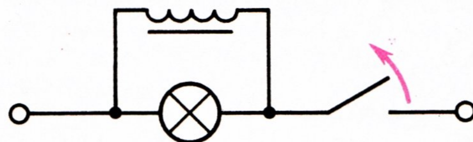
Magnetinis laukas, atsiradęs apie laidininką, kuriuo teka elektros srovė, veria ir patį tą laidininką. Tada, kai šis savasis magnetinis laukas atsiranda arba išnyksta, stiprėja arba silpnėja, trumpai tariant, kai jis kinta, indukuojasi EVJ ir tame laidininke, kurio srovė tą lauką kuria. Savosios grandinės laiduose magnetinio lauko indukuotoji EVJ vadinama **saviindukcine EVJ,** o saviindukcinės EVJ sukelta srovė — **saviindukcine srove.** Pagal Lenco taisyklę, saviindukcinė srovė visuomet teka ta kryptimi, kad trukdytų savo atsiradimo priežasčiai — srovės kitimui. Vadinasi, saviindukcinė srovė stengiasi palaikyti grandinėje esamą būseną. Todėl, įjungiant arba didinant srovę grandinėje, saviindukcinė srovė yra priešingos krypties, o išjungiant arba mažinant srovę — tos pačios krypties.



40.1 pav.



40.2 pav.



40.3 pav.

Elektros grandinių inercija

Saviindukcinė EVJ stengiasi sulaikyti srovės kitimą grandinėje, todėl saviindukciją galima palyginti su inercija mechanikoje. Inercija — kūnų savybė išlaikyti pastovų judėjimo greitį, priešintis greičio kitimui. Saviindukcija — elektros grandinių savybė išlaikyti pastovią srovę, priešintis srovės kitimui.

Sujungus grandinę srovė dėl saviindukcijos ne iš karto pasiekia maksimalią vertę — stiprėja tolydžiai. Grandinę išjungus saviindukcija dar kurį laiką palaiko srovę.

Tiesiame laidininke saviindukcijos reiškinys beveik nepastebimas. Tačiau didelės saviindukcinės EVJ atsiranda grandinėse, kuriose įjungtos ritės su geležinėmis šerdimis (elektros variklių, transformatorių, elektromagnetų).

Saviindukcijos anatomija

Priešingos krypties saviindukcinės EVJ atsiradimą srovės įjungimo momentu galima pademonstruoti 40.1 paveiksle parodyta grandine. Nuosekliai su elektros lempute įjungus ritę su geležine šerdimi, lemputė užsidega ne iš karto paspaudus mygtuką, o šiek tiek pavėluotai. To ir buvo laukiama: pradėjus tekėti ritės apvija srovei, atsiranda magnetinis laukas, kuris kerta tos ritės vijas ir indukuoja priešingos krypties saviindukcinę srovę, stabdančią srovės didėjimą grandinėje. Grafiškai šis procesas vaizduojamas 40.2 paveikslo kreivės dalimi *OA*.

Prijungus tą pačią ritę prie lemputės lygiagrečiai (40.3 pav.), galima stebėti saviindukcinės srovės atsiradimą grandinę išjungiant. Išjungus jungiklį, lemputė ryškiai blyksteli ir lėtai užgęsta (grafiko dalis *BC*). Saviindukcinė srovė dabar teka ta pačia kryptimi, kuria tekėjo šaltinio srovė.

Nesant lemputės grandinėje ritės, srovės stiprumas ją įjungiant ir išjungiant kinta taip, kaip rodo 40.2 paveikslo grafikas *ODEF*.

§ 40.2. Ritės induktyvumas

Svarbi ritės savybė

Srovės kuriamas magnetinis laukas, kaip žinome, tuo stipresnis, kuo stipresnė pati srovė. Todėl ritę kertantis savasis magnetinis srautas taip pat turi būti proporcingas srovės stiprumui:

$$\Phi = LI. \qquad (40.1)$$

Šioje formulėje įrašytas proporcingumo koeficientas L vadinamas ritės **induktyvumu.** Induktyvumas, kaip ir elektrinė talpa, yra paties laidininko, t. y. ritės ypatybė, priklausanti nuo jos formos, matmenų, vijų skaičiaus ir šerdies. Induktyvumo SI vienetas vadinamas henriu ir žymimas H. Iš (40.1) formulės

$$L = \frac{\Phi}{I}; \quad \frac{1}{1}\frac{\text{Wb}}{\text{A}} = 1 \text{ H}.$$

Šis vienetas taip pavadintas amerikiečių fiziko Džozefo H e n r i o (1797—1878), atradusio saviindukcijos reiškinį, garbei. Nedideli induktyvumai matuojami tūkstantosiomis ir milijonosiomis henrio dalimis, t. y. milihenriais ir mikrohenriais: 10^{-3} H = 1 mH; 10^{-6} H = 1 μH.

Saviindukcinės EVJ formulė

Indukcinės EVJ išraiškoje (39.2) vietoje magnetinio srauto pokyčio $\Delta\Phi$, įrašykime jo išraišką, išplaukiančią iš (40.1): $\Delta\Phi = L\Delta I$. Gauname:

$$E = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}. \qquad (40.2)$$

Vadinasi, saviindukcinė EVJ yra proporcinga ritės induktyvumui ir srovės kitimo greičiui. Būtent todėl didžiausios saviindukcinės EVJ ir srovės būna grandinės įjungimo ir išjungimo momentais.

Didelį induktyvumą turinčiose elektros generatorių, galingų variklių ir elektromagnetų apvijose, išjungiant jų grandines, susidaro saviindukcinės EVJ, galinčios pramušti izoliaciją. Todėl tokiose grandinėse naudojamos specialios apsaugos priemonės. Ypač svarbus ričių saviindukcijos vaidmuo radiotechnikos kontūruose (§ 43.2).

▲ **40.1.** Kokia saviindukcinė EVJ atsiras 68 mH induktyvumo ritėje, jeigu ja tekanti 3,8 A stiprumo srovė išnyks per 0,012 s?

▲ **40.2.** Kai ritės vijomis teka 5,0 A srovė, joje atsiranda 0,015 Wb magnetinis srautas. Ritės induktyvumas 60 mH. Kiek joje vijų?

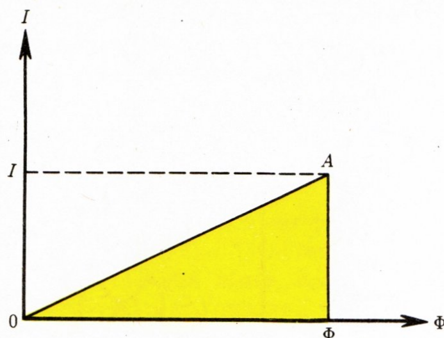
§ 40.3. Magnetinio lauko energija

Saviindukcijos reiškinį palyginome su inercijos reiškiniu mechanikoje. Saviindukcija elektros grandinėse, kaip ir inercija masę turinčiuose kūnuose, priešinasi būsenos kitimui. Didinant kūno greitį, reikia atlikti darbą, lygų kūno įgytai judėjimo energijai

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \qquad (40.3)$$

Srovei stiprėjant grandinėje veikia priešingos krypties indukcinė EVJ. Jai nugalėti eikvojama srovės šaltinio energija, kuri virsta stiprėjančio drauge su srove jos magnetinio lauko energija E_{magn}. Kaip ją apskaičiuoti?

Ritės magnetinio lauko energija E_{magn} matuojama darbu, atliktu sukuriant šį lau-



40.4 pav.

ką: $E_{magn} = A$. Žinome (§ 37.3), kad darbas, atliekamas magnetiniame lauke judant laidininkui, lygus juo tekančios srovės stiprumo ir magnetinio srauto, kurį kerta laidininkas, sandaugai: $A = I\Delta\Phi$ (37.6). Kai laidininkas nejuda, bet didėja jo savasis magnetinis srautas, stiprėjant juo tekančiai srovei, šioje formulėje reikia įrašyti daugiklį $\frac{1}{2}$, t. y. $A = \frac{1}{2}I\Delta\Phi$.

40.4 paveiksle šis darbas grafiškai vaizduojamas trikampio OAB plotu.

Įrašome į darbo formulę magnetinio srauto išraišką (40.1) $\Phi = LI$: $A = \frac{I}{2}LI = \frac{LI^2}{2}$ Vadinasi,

$$E_{magn} = \frac{LI^2}{2}. \qquad (40.4)$$

Stebina (40.3) ir (40.4) formulių struktūros ir prasmės analogija. Ji dar kartą pabrėžia fizikinių reiškinių įvairovę ir vienybę.

▲ **40.3.** 95 mH induktyvumo ritės magnetinio lauko energija 0,19 J. Kokio stiprumo srovė teka rite?

▲ **40.4.** Ritę, kurios varža 8,2 Ω ir induktyvumas 25 mH, veikia pastovi 55 V nuolatinė įtampa. Kiek energijos išsiskirs nutraukus ritės grandinę? Kokia vidutinė saviindukcinė EVJ joje indukuosis, jei energija išsiskirs per 12 ms?

? *1. Kodėl 40.1 paveiksle parodytame bandyme, ištraukus iš ritės šerdį, efektas susilpnėja?*
2. 40.1 paveikslo grandinėje ritę pakeitus tokios pat varžos rezistoriumi, lemputė užsižiebia iš karto. Kodėl?
3. Paaiškinkite, kaip saviindukcinė EVJ „priešinasi" srovės mažėjimui ritėje (40.3 pav.).
4. Kokį procesą apibūdina 40.2 paveikslo grafiko dalys OD ir EF?
5. Atsakykite į paskaitos pavadinimo klausimą.

■ **40.5.** Per kiek laiko 240 mH induktyvumo ritėje srovė sustiprėja nuo 0 iki 11,4 A, jei tuo metu atsiranda 30 V vidutinė saviindukcinė EVJ?

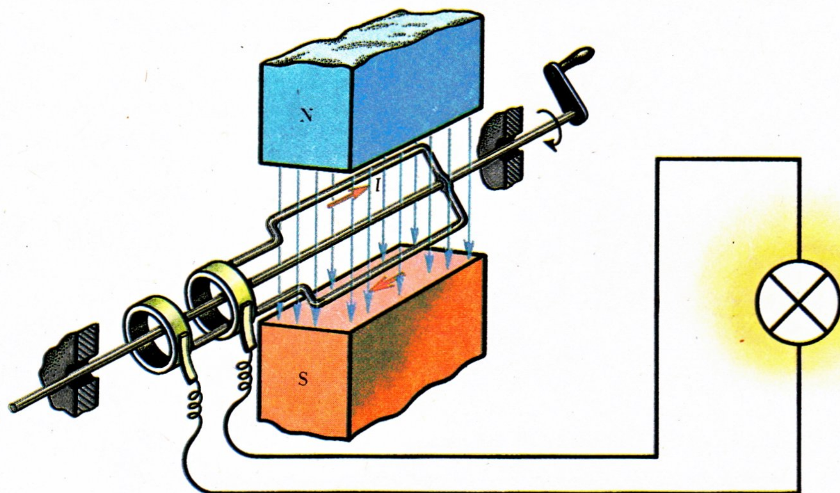
■ **40.6.** Rėmelis iš 40 vielos vijų apima 240 cm² plotą. Jis yra vienalyčiame magnetiniame lauke, statmename jo plokštumai. Rėmeliui pasisukus 1/4 apsisukimo per 0,15 s, jame indukuojasi vidutinė 160 mV EVJ. Apskaičiuokite magnetinio lauko indukciją.

3.3 skyrius
KINTAMOJI SROVĖ

41 paskaita
ELEKTRA BE PLIUSO IR MINUSO

§ 41.1. Kintamosios srovės gavimas

XIX a. pradžioje jau buvo išrasti palyginti galingi mechaninės energijos šaltiniai — garo mašina, garo turbina,— tobulėjo vidaus degimo variklis. O elektra buvo gaunama tik primityviausiu cheminiu būdu. Pavyzdžiui, kai rusų inžinierius ir išradėjas P. J a b l o č k o v a s pagamino traukiniui prožektorių su elektros lanku, paskui garvežį važiavo vagonas, prikrautas vien galvaninių elementų baterijų. Jų užtekdavo vienam reisui Peterburgas—Varšuva. Tik po to, kai Faradėjus atrado būdą, kaip mechaninę energiją paversti elektros



41.1 pav.

energija, atsivėrė galimybė plačiai naudotis elektra.

Indukcinio generatoriaus prototipas

Laidininke atsiranda indukcinė EVJ, kai kinta jį veriantis magnetinis srautas. Praktiškai tai galima pasiekti sukant rėmelį magnetiniame lauke (41.1 pav.). Vienoje kraštinėje indukuotos EVJ didumą nusako (39.1) formulė: $e' = Blv \sin \alpha$. Kadangi kampas α tarp magnetinio lauko linijų ir laidininko judėjimo greičio krypčių (41.2 pav.) visą laiką kinta, tai pastarąja formule išreiškiama **momentinė** EVJ vertė — vertė konkrečiu laiko momentu, atitinkančiu konkretų kampo α didumą. Abiejose aktyviose rėmelio kraštinėse indukuotos EVJ momentinė vertė $e = 2e'$, t. y.

$$e = 2Blv \sin \alpha. \quad (41.1)$$

Kai $\alpha = 0$, tai ir $e = 0$. Maksimali momentinė EVJ vertė būna tais momentais, kai $\alpha = 90°$; tada

$$e = E_m = 2\ Blv. \quad (41.2)$$

Taigi momentinės EVJ formulę galime sutrumpintai užrašyti šitaip:

$$e = E_m \sin \alpha. \quad (41.3)$$

Maksimaliąją vertę E_m vadiname EVJ **amplitudine** verte.

Jeigu rėmelis pradeda suktis iš padėties $\alpha = 0$ ir sukasi pastoviu kampiniu greičiu ω, tai per laiką t jis pasisuka kampu

$$\alpha = \omega t. \quad (41.4)$$

Todėl (41.3) lygtį galime perrašyti:

$$e = E_m \sin \omega t. \quad (41.5)$$

Tai — jau žinomi iš svyravimų fizikos **harmoniniai svyravimai.** Taigi, *tolygiai sukant rėmelį magnetiniame lauke, rėmelyje indukuojasi EVJ, periodiškai kintanti sinuso dėsniu.* Šios EVJ grafikas yra **sinusoidė** (41.3 pav.). Šį grafiką — sinusoidę — galima stebėti oscilografo ekrane, sukant prie oscilografo gnybtų prijungtą generatoriaus modelį.

Bet kokio fizikinio dydžio kitimas sinuso dėsniu vadinamas *harmoninguoju* (taisyklinguoju) *svyravimu,* o jį aprašanti (41.5) pavidalo lygybė — *harmoningojo svyravimo lygtimi.* Taip kinta, pavyzdžiui, nuokrypa nuo pusiausvyros padėties ir greitis supantis ilgomis sūpynėmis (tais momen-

tais, kai nuokrypa būna didžiausia, greitis lygus nuliui, ir atvirkščiai). Sujungus rėmelio galus laidininku, uždara grandine tekės srovė, kuri, būdama proporcinga EVJ, kis tuo pačiu dėsniu

$$i = I_m \sin \omega t; \qquad (41.6)$$

čia i — momentinė srovės stiprumo vertė (41.3 pav.). *Srovė, kurios stiprumas ir kryptis periodiškai kinta, vadinama* **kintamąja srove.** Taigi kintamoji srovė „neturi“ tradicinio pliuso ir minuso. Elektros schemose, matavimo prietaisų skydeliuose ji žymima sutartiniu ženklu „∼“. Analizuodami kintamosios srovės lygtį (41.6), aptarsime keturis ją apibūdinančius dydžius — srovės parametrus.

Kintamosios srovės parametrai

1. Maksimali kintamosios srovės vertė I_m vadinama kintamosios srovės **amplitudine verte** arba tiesiog **amplitude.**

2. Laikas, per kurį įvyksta vienas kintamosios srovės pasikeitimas (rėmelis apsisuka vieną kartą), vadinamas kintamosios srovės **periodu.** Periodas žymimas raide T ir matuojamas sekundėmis.

3. Svyravimų skaičius per vieną sekundę vadinamas kintamosios srovės *dažniu*. Dažnis žymimas raide ν.

Dažnis ir periodas — vienas kitam atvirkštiniai dydžiai:

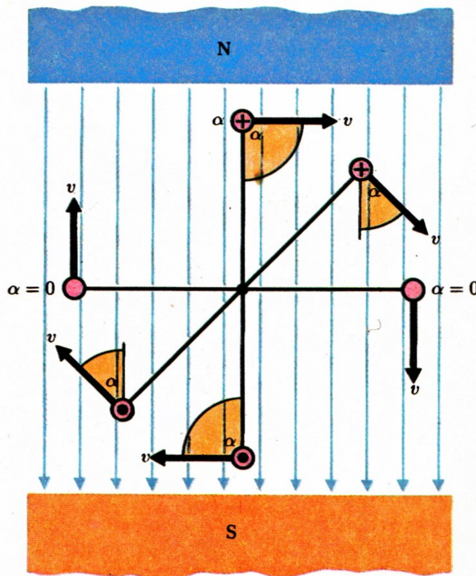
$$\nu = 1/T, \text{ arba } T = 1/\nu. \qquad (41.7)$$

SI dažnio vienetas — vienas svyravimas per sekundę — vadinamas hercu (Hz) vokiečių fizikui Heinrichui H e r c u i (1857—1894) atminti. Taigi

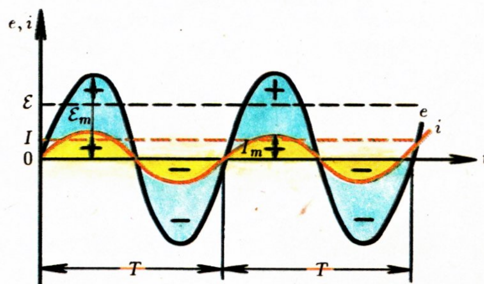
$$1 \text{ Hz} = 1/1 \text{ s} = 1 \text{ s}^{-1}.$$

Elektros energetikoje daugiausia vartojama standartinio dažnio kintamoji srovė. Lietuvoje ir daugelyje kitų Europos šalių standartinis kintamosios srovės dažnis — 50 Hz. Radiotechnikoje ir televizijoje naudojamos **aukšto dažnio srovės;** jų dažniai matuojami kilohercais ($1 \text{ kHz} = 10^3$ Hz) ir megahercais ($1 \text{ MHz} = 10^6$ Hz).

4. Srovės stiprumo konkrečiu laiko momentu vertė priklauso nuo to, kokioje padėtyje yra tuo momentu besisukantis rėmelis. Tą padėtį galima nusakyti nurodant posūkio kampą laipsniais arba radianais, t. y. (41.6) formulėje esančio sinuso argumentą ωt; šią sandaugą vadiname **fazės kampu,** arba tiesiog **faze** ir žymime φ. Taigi fazė $\varphi = \omega t$.



41.2 pav.



41.3 pav.

Kampinį sukimosi greitį ω galime išreikšti dažniu ν: posūkio kampas per periodą T lygus 2π rad, taigi $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \times \times \frac{1}{T} = 2\pi\nu$. Todėl svyravimo fazė

$$\varphi = \omega t = 2\pi\nu t.$$

Beje, laiko atskaitos pradžia $t = 0$ gali ir nesutapti su svyravimo pradžia $\varphi = 0$: pavyzdžiui, rėmelis pradedamas sukti ne iš padėties $\alpha = 0$ (41.2 pav.), o iš bet kurios kitos padėties. Tokiu atveju reikia įskaityti svyravimo fazę laiko momentu $t = 0$. Ją vadiname **pradine faze** ir žymime φ_0. Todėl bendriausiu atveju

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t = \varphi_0 + 2\pi\nu t, \qquad (41.8)$$

ir srovė kinta dėsniu

$$i = I_m \sin(\varphi_0 + \omega t) = I_m \sin(\varphi_0 + 2\pi\nu t). \qquad (41.9)$$

Analogiškomis lygybėmis galime aprašyti elektrovaros jėgos ir įtampos svyravimą. Svyravimo parametrai: amplitudė, periodas, dažnis ir fazė vartojami apibūdinti bet kurio fizikinio dydžio harmoningam kitimui.

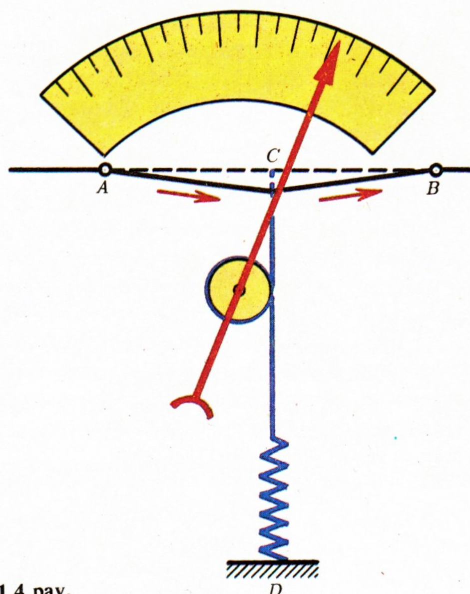
41.1. Rėmelis iš 45 vijų, apimantis $3{,}6 \cdot 10^2$ cm^2 plotą, yra vienalyčiame 0,032 T indukcijos magnetiniame lauke. Rėmelio galai prijungti prie pusžiedžių su šepetėliais. Jo sukimosi ašis statmena jėgų linijoms, o pusžiedžiai pereina nuo vieno šepetėlio prie kito tuo momentu, kai EVJ lygi nuliui. Koks būna vidutinis šepetėlių potencialų skirtumas, rėmeliui tolygiai sukantis 420 aps/min dažniu?

---

§ 41.2. Kintamosios srovės stiprumo ir įtampos efektinės vertės

Ką rodo ampermetras?

Nuolatinės elektros srovės darbas, taigi ir suvartota energija ar išsiskyrusi šiluma priklauso nuo tekančios srovės stiprumo: $A = I^2Rt$. Energijos išsiskyrimui, tekant kintamajai srovei, įvertinti įvedama srovės, įtampos ir EVJ **efektinių verčių** sąvoka. Jeigu elektrodinaminį prietaisą, skirtą matuoti nuolatinei srovei, įjungtume į kintamosios srovės grandinę, tai jo rodyklė nespėtų svyruoti tokiu dažniu ir tik virpėtų apie pusiausvyros padėtį. Todėl kintamajai srovei matuoti naudojami prietaisai, kurių veikimas pagrįstas laidininko šilimu tekant srovei. Šilimas nepriklauso nuo srovės krypties — priklauso tik nuo vidutiniškai per vieną periodą atliekamo darbo. 41.4 paveiksle parodyta šiluminio ampermetro konstrukcija. Jo pagrindinė dalis yra vielelė AB, prie kurios prijungta atotampa CD, užsukta ant skridinėlio su rodykle. Kuo stipresnė srovė teka vielele, tuo smarkiau ji kaista, ilgėja ir tuo didesniu kampu pasisuka rodyklė. Toks ampermetras, sugraduotas leidžiant nuolatinę srovę, ir rodo srovės stiprumo *efektinę vertę*. Taigi galime



41.4 pav.

sakyti, kad *efektinis kintamosios srovės stiprumas — tai stiprumas tokios nuolatinės srovės, kuriai tekant išsiskiria tiek pat šilumos kaip ir tekant kintamajai srovei.* Efektinės vertės žymimos taip pat, kaip nuolatinės srovės parametrai, t. y. I, U, E.

Galima apskaičiuoti, kad kintamosios srovės stiprumo efektinė vertė mažesnė už maksimaliąją $\sqrt{2}$ karto:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \qquad (41.10)$$

Analogiškai ir kintamosios EVJ bei įtampos efektinės vertės mažesnės už maksimaliąsias taip pat $\sqrt{2}$ karto:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \qquad (41.11)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \qquad (41.12)$$

Elektriniai matavimo prietaisai, įjungti į kintamosios srovės grandinę, rodo efektines dydžių vertes.

41.2. Buitinio elektros tinklo mūsų namuose efektinė įtampa — 220 V. Kokia būna maksimali ir minimali įtampos vertė? Kodėl nemirkčioja elektros lemputės, nors įtampa kinta?

41.3. Elektrovaros jėga kintamosios srovės grandinėje išreiškiama formule $E = 120 \sin 628t$. Apskaičiuokite EVJ efektinę vertę ir jos kitimo periodą.

§ 41.3. Kintamosios srovės generatorių konstrukcija

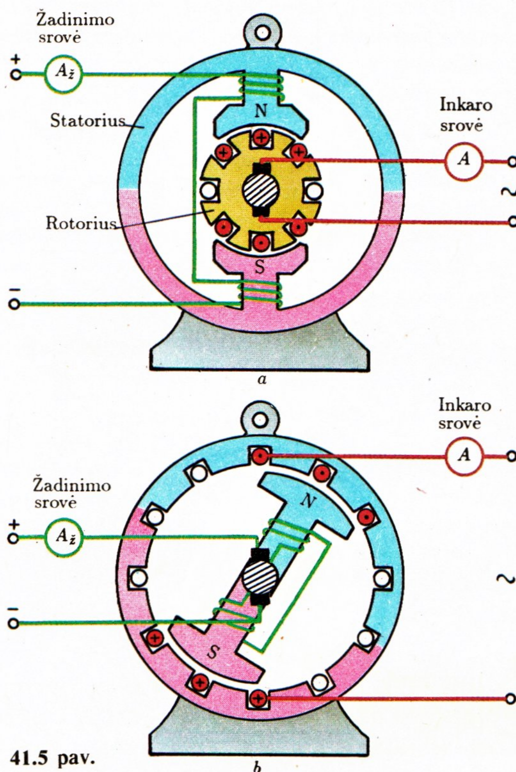
Sukant rėmelį magnetiniame lauke (41.1 pav.), mechaninė energija virsta elektros energija. *Elektros mašina, mechaninę energiją paverčianti elektros energija, vadinama* **elektros energijos generatoriumi.** Vadinasi, minėtas rėmelis yra paprasčiausias kintamosios srovės generatoriaus modelis. Jeigu jį sudaro ne viena, o daugiau vijų, tai gaunama atitinkamai didesnė kintamoji EVJ ir stipresnė srovė.

Pagrindinės generatoriaus dalys

Šiuolaikiniai pramoniniai generatoriai yra sudėtingos mašinos su automatinėmis kontrolės, reguliavimo ir apsaugos sistemomis, tačiau visuose yra trys pagrindinės dalys:

1) mašinos dalis, kuri sukuria magnetinį lauką — vadinamasis **induktorius,** 2) mašinos dalis, kurioje indukuojasi EVJ — vadinamasis **inkaras** ir 3) **slystantieji kontaktai** srovei perduoti.

Induktorius — tai elektromagnetas, kurio apvija teka vadinamoji *žadinimo srovė* (41.5 pav.). Jos kuriamas magnetinis srautas sklinda beveik uždara magnetine siste-



41.5 pav.

ma, kurią sudaro dvi šerdys. Mašinos korpusas ir nejudanti šerdis su žadinimo apvija — tai nejudanti mašinos dalis, vadinama **statoriumi.** Jos viduje sukasi antroji šerdis, kurios grioveliuose suklota inkaro apvija. Ši besisukanti mašinos dalis vadinama **rotoriumi.** Iš besisukančio rotoriaus srovė perduodama į elektros tinklą slystančiaisiais kontaktais: prie rotoriaus apvijos galų pritvirtinami **kontaktiniai žiedai,** o prie jų prispaudžiamos grafitinės kaladėlės — **šepečiai,** sujungti su išorine grandine (41.5 pav., *a* ir 41.1 pav.).

Nėra padėties be išeities

Veikiant galingam generatoriui, slankiaisiais kontaktais teka stipri srovė. Tai sudėtinga: šepečiai kibirkščiuoja, kaista, greitai apdega kontaktiniai žiedai. Todėl galinguose generatoriuose induktorius ir inkaras sukeičiami vietomis: inkaro apvija, kurioje indukuojasi didelė srovė, nejudamai įtvirtinama statoriaus šerdies grioveliuose, o rotoriumi tampa besisukantis elektromagnetas; jis vadinamas induktoriumi (41.5 pav., *b*). Induktoriui maitinti reikalinga žadinimo srovė daug kartų silpnesnė už generuojamąją srovę. Ją tiekia specialus to paties veleno sukamas nuolatinės srovės generatorius — žadinimo generatorius.

? *1. Kuriame krašte yra 41.4 paveiksle parodyto ampermetro nulinė atžyma?*
2. Surašykite lentelėje srovės, įtampos ir galios momentines, maksimalias ir efektines vertes. Parašykite ryšius tarp šių verčių.
3. Kam lygi kintamosios srovės stiprumo vidutinė vertė per periodą?
4. Kodėl plieninės induktorių šerdys neliejamos ištisinės, o surenkamos iš plonų vienas nuo kito izoliuotų plieno lakštų?
5. Ką „žadina“ žadinimo srovė?
6. Kokia kryptimi teka žadinimo srovė 41.5 paveiksle atvaizduotame generatoriuje?
7. Koks kintamosios srovės stiprumo efektinės vertės grafikas?

41.4. Srovės stiprumas kinta dėsniu $i = 8{,}5\ \mathrm{A} \times \times \sin(314t + 0{,}651)$. Apskaičiuokite jo efektinę vertę, pradinę fazę ir dažnį. Koks yra srovės stiprumas momentais $t_1 = 0{,}08$ s ir $t_2 = 0{,}042$ s?

41.5. Ritės įtampa ir ja tekančios srovės stiprumas kinta šitaip: $u = 60\ \mathrm{V} \cdot \sin(314t + 0{,}25)$ ir $i = 15\ \mathrm{A} \cdot \sin 314t$. Raskite šių dydžių fazių skirtumą ir jų vertes momentu $t = 1{,}2 \cdot 10^{-2}$ s.

---

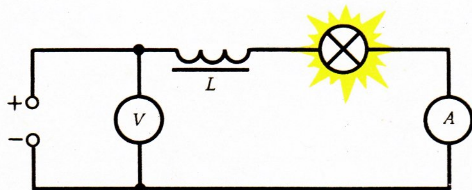
42 paskaita

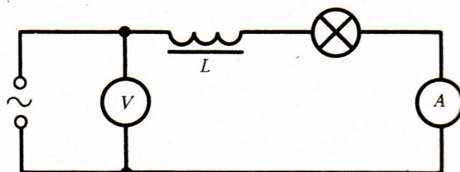
KAS TOJI REAKTYVINĖ VARŽA?

§ 42.1. Ritė kintamosios srovės grandinėje

Akivaizdu, nors neįtikėtina

Didelį induktyvumą turinčią ritę su feromagnetine šerdimi įjunkime nuosekliai su elektros lempute ir ampermetru į nuolatinės ir kintamosios srovės grandines (42.1 pav., *a, b*). Įtampa abiem atvejais turi būti vienoda. Nustebsime pamatę, kad nuolatinės srovės grandinėje lemputė šviečia, o kinta-





42.1 pav.

mosios — ne. Traukiant iš ritės šerdį, nuolatinės srovės stiprumas nekinta, o kintamosios didėja, lemputė pradeda šviesti.

Naujo tipo varža

Ritės induktyvumo įtaką kintamajai srovei nesunku paaiškinti, remiantis saviindukcijos reiškiniu (§ 40.1). Nuolatinės srovės grandinėje saviindukcija pasireiškia tik įjungiant ir išjungiant srovę. Tačiau 50 Hz dažnio kintamosios srovės grandinėje tokie „jungimai" kartojasi 100 kartų per sekundę! Kintant srovei grandinėje atsiranda proporcinga jos kitimo greičiui, todėl gana didelė saviindukcinė EVJ $E = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Pastaroji stabdo srovės kitimą, mažina jos amplitudę I_m, taigi veikia tarsi papildoma varža.

Vadinasi, tos pačios grandinės varža nuolatinei ir kintamajai srovei gali būti skirtinga. Varža nuolatinei srovei vadinama **aktyviąja varža** ir žymima R. *Dėl aktyviosios varžos elektros energija negrįžtamai virsta šiluma.*

Ritės sudaroma papildoma varža kintamajai srovei vadinama **induktyviąja varža** ir žymima X_L. *Dėl induktyviosios varžos elektros energija neeikvojama:* srovei stiprėjant elektros srovės energija E_{sr} virsta ritės magnetinio lauko energija E_{magn}, o srovei silpnėjant magnetinio lauko energija vėl virsta elektros srovės energija — grįžta atgal į tinklą. *Dėl induktyviosios varžos grandinėje vyksta tik energijos kaita* $E_{sr} \rightleftarrows E_{magn}$.

Ritės induktyvioji varža priklauso nuo saviindukcinės EVJ didumo, t. y. nuo ritės induktyvumo L ir nuo srovės kitimo greičio ω:

$$X_L = \omega L. \qquad (42.1)$$

Omo dėsnis grandinės daliai, kurioje yra *tik induktyvioji varža,* išreiškiamas šitaip:

$$I = \frac{U}{X_L}. \qquad (42.2)$$

42.1. 35,0 mH induktyvumo ritė įjungta į kintamosios srovės grandinę. Kokia yra jos induktyvioji varža, kai srovės dažnis 60, 240 ir 480 Hz?

---

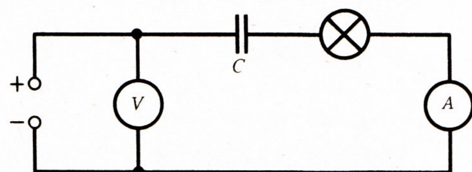
§ 42.2. Kondensatorius kintamosios srovės grandinėje

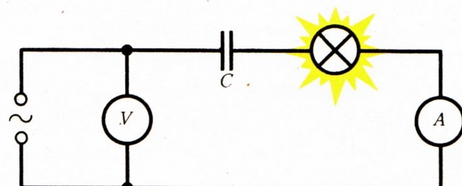
Dar vienas netikėtas rezultatas

Nuosekliai su elektros lempute ir ampermetru prijunkime kondensatorių ir vėl įjunkime paeiliui į nuolatinės ir kintamosios srovės grandines, kurių įtampa vienoda (42.2 pav., *a, b*). Pamatysime, kad nuolatinės srovės grandinėje srovė neteka, lemputė nešviečia. Tačiau kintamosios srovės grandinėje lemputė šviečia!

Ir dar kitokia varža!

Kodėl neteka šia grandine nuolatinė srovė, suprantama: tarp kondensatoriaus plokščių yra izoliacija. Sujungus grandinę, kondensatoriaus plokštės akimirksniu įsikrauna





42.2 pav.

priešingų ženklų krūviais ir srovė nutrūksta.

Veikiant kintamajai įtampai, kondensatorius periodiškai įsikrauna ir išsikrauna, todėl grandine teka kintamoji srovė.

Kondensatoriaus sudaroma varža kintamajai srovei vadinama **talpine varža** ir žymima X_C. Ši varža tuo mažesnė, kuo didesnis srovės kitimo greitis ω ir kuo didesnė kondensatoriaus talpa *C:*

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \qquad (42.3)$$

Talpinė varža matuojama taip pat omais. Omo dėsnis grandinės daliai, kurioje yra *tik talpinė varža,* išreiškiamas šitaip:

$$I = \frac{U}{X_C}. \qquad (42.4)$$

Kokia energijos kaita vyksta dėl talpinės varžos? Kol įtampa didėja, kondensatorius įsikrauna, jo elektriniame lauke kaupiasi energija. Kai įtampa mažėja, kondensatorius išsikrauna, elektrinio lauko energija vėl virsta elektros srovės energija ir grįžta atgal į tinklą. *Grandinėje su neturinčiu aktyviosios varžos kondensatoriumi elektros energija neeikvojama. Vyksta tiktai energijos svyravimai:*

$$E_{sr} \rightleftarrows E_{el}.$$

Talpinė ir induktyvioji varžos vadinamos **reaktyviosiomis varžomis.** Įdomu pastebėti, kad nuosekliai sujungtų ritės ir kondensatoriaus bendra reaktyvioji varža X lygi ne jų varžų X_L ir X_C sumai, o skirtumui:

$$X = X_L - X_C. \qquad (42.5)$$

Šios lygybės neįrodinėsime, tik atkreipsime dėmesį į tai, kad ji plačiai taikoma skaičiuojant elektrotechnikos ir radiotechnikos grandines, kuriose induktyvumas ir talpa vaidina labai svarbų vaidmenį.

▲ **42.2.** 250 μF talpos kondensatorius įjungiamas į kintamosios srovės grandinę. Apskaičiuokite jo varžą, kai srovės dažnis 50, 200 ir 400 Hz.

§ 42.3. Kintamosios srovės transformavimas

Svarbi kintamosios srovės ypatybė

Vartojant elektros energiją, reikalinga labai įvairi įtampa — nuo keleto voltų žaisliniams traukinėliams iki tūkstančių ir šimtų tūkstančių voltų tolimo elektros perdavimo linijose. Vien televizoriui „Tauras“ reikalingos įvairiausios įtampos nuo 6 V lempų katodams kaitinti iki 25 000 V elektronų spinduliui greitinti kineskope.

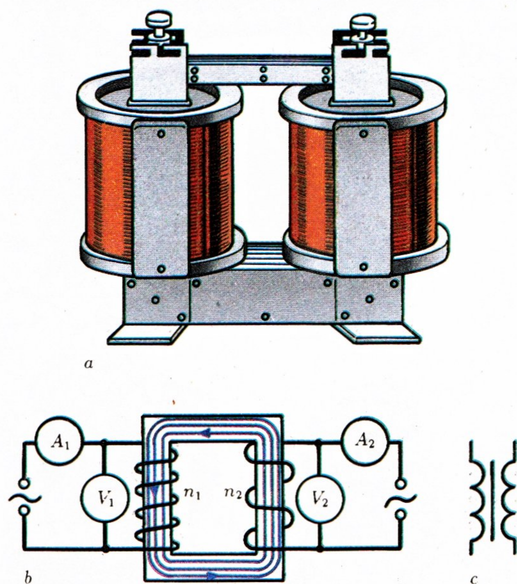
Kintamosios srovės įtampą nesudėtinga keisti beveik neprarandant energijos. Ši jos ypatybė ir lėmė tai, kad technikoje daugiausia vartojama kintamoji, o ne nuolatinė srovė.

Kintamosios srovės įtampos ir srovės keitimas, nekeičiant dažnio, vadinamas **transformavimu,** o elektromagnetinis aparatas, skirtas kintamajai srovei transformuoti, vadinamas **transformatoriumi.**

Generatorius — vien tik statorius — transformatorius

Transformatorius (42.3 pav.) susideda iš dviejų pagrindinių dalių: *1* — uždaros šerdies, surinktos iš tarpusavyje izoliuotų plieno lakštų, ir *2* — ant šerdies užvyniotų dviejų ričių, kurių vijų skaičius n_1 ir n_2 skirtingas. 42.3 paveiksle parodytas transformatoriaus bendras vaizdas (*a*), jo elektrinė schema (*b*) ir sutartinis žymėjimas (*c*).

Ritė, jungiama į transformuojamosios įtampos tinklą, vadinama **pirmine,** o antroji ritė, kurioje susidaro reikiama įtampa, vadinama **antrine.** Jeigu antrinėje apvijoje yra daugiau vijų negu pirminėje ($n_2 > n_1$), tai transformatorius yra įtampą **aukštinantysis,** o jeigu atvirkščiai — **žeminantysis.** Kiekvieną transformatorių galima panaudoti ir kaip įtampą aukštinantį, ir kaip žeminantį.



42.3 pav.

Kaip veikia transformatorius

Įjungus pirminę ritę į tinklą, kintamoji srovė sukuria transformatoriaus šerdyje kintamąjį magnetinį srautą. Šis srautas veria abiejų ričių vijas ir indukuoja jose EVJ. Kadangi abi transformatoriaus apvijas veria tas pats magnetinis srautas, tai *kiekvienoje vijoje indukuojasi vienoda EVJ*. Todėl *apvijose indukuotos EVJ yra tiesiog proporcingos jų vijų skaičiui:*

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{n_1}{n_2}. \qquad (42.6)$$

Kadangi apvijų aktyvioji varža nedidelė, tai galima sakyti, kad praktiškai elektrovaros jėgos yra lygios įtampoms tarp apvijų galų: $E_1=U_1$ ir $E_2=U_2$. Todėl ir *apvijų įtampos yra tiesiog proporcingos jų vijų skaičiui:*

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}. \qquad (42.7)$$

Vijų skaičiaus pirminėje ir antrinėje apvijose santykis vadinamas **transformacijos koeficientu** ir žymimas *k:*

$$k=\frac{n_1}{n_2}=\frac{U_1}{U_2}. \qquad (42.8)$$

Šiuolaikiniuose transformatoriuose nuostoliai, perduodant energiją iš vienos ritės į kitą, nebūna didesni kaip 1—2%. Todėl galima sakyti, kad srovės galia pirminėje ir antrinėje apvijose apytiksliai vienoda: $P_1=P_2$. Kadangi $P_1=I_1U_1$, o $P_2=I_2U_2$, tai galima rašyti: $I_1U_1=I_2U_2$ arba

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{U_2}{U_1}=\frac{n_2}{n_1}. \qquad (42.9)$$

Transformatoriaus apvijomis tekančių srovių stiprumai yra atvirkščiai proporcingi vijų skaičiui.

?

1. Kodėl transformatoriaus šerdis ne ištisinė, o sudaryta iš atskirų vienas nuo kito izoliuotų plieno lakštų?

2. Kaip galima nustatyti ritės vijų skaičių, jos neišvyniojus?

3. Koks transformatorius vadinamas žeminančiuoju?

4. Kodėl transformatorius palyginamas su generatoriaus statoriumi?

42.3. Rėmelis iš 60 vijų yra vienalyčiame 0,025 T indukcijos magnetiniame lauke ir tolygiai sukasi apie statmeną jėgų linijoms nejudančią ašį, atlikdamas po 360 apsisukimų per minutę. Rėmelio kraštinės, lygiagrečios sukimosi ašiai, yra 96 cm ilgio, o atstumas nuo sukimosi ašies 20 cm. Apskaičiuokite rėmelyje indukuojamos EVJ efektinę vertę.

42.4. Ritės aktyvioji varža 4,0 Ω, o srovės stiprumas išreiškiamas formule $i=6{,}4\ \mathrm{A}\cdot\sin 314t$. Apskaičiuokite aktyviąją galią ir didžiausią srovės vertę.

---

43 paskaita
ENERGETIKOS EKONOMIKA

§ 43.1. Elektros energijos gamyba ir perdavimas

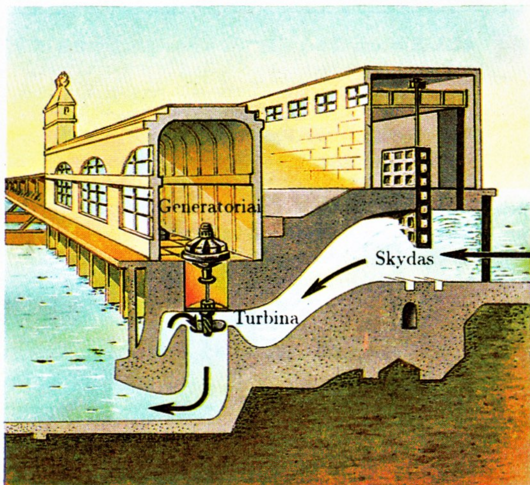
Iš ko daroma elektra?

Elektros energija gaminama **elektrinėse** vartojant pirminių šaltinių energiją. Pagal vartojamos energijos rūšį elektrinės skirstomos į šilumines elektrines (ŠE), hidroelektrines (HE), atomines elektrines (AE), saulės, vėjo ir kitokias.

Šiluminėse elektrinėse pirminis energijos šaltinis yra kuras — nafta, anglis, skalūnai, mazutas, dujos. ŠE ekonominiai rodikliai labai pagerėja, jeigu aušinant agregatus įšilusio vandens energija panaudojama miestams centralizuotai apšildyti. Tai — termofikacinės elektrinės.

Hidroelektrinėse (43.1 pav.) vandens srauto energija verčiama elektros energija.

HE statyba kainuoja maždaug dešimt kartų brangiau negu tokios pat galios ŠE, bet jos gaminama elektros energija yra pigiausia. Tačiau negalima pamiršti dar vienos problemos: pastačius HE užtvankas aukščio skirtumui sudaryti, užliejami nemaži žemės plotai.



43.1 pav.

Paskutiniais dešimtmečiais visame pasaulyje vis daugiau elektros energijos pagaminama atominėse elektrinėse. Atominis kuras labai brangus: perdirbus 1 t urano rūdos, gaunami tik 5 g urano, tinkamo atominiam kurui. Tačiau iš tų 5 g atominiame reaktoriuje pagaminama 112 000 kW·h elektros energijos — tiek pat, kiek sudeginant 15 t anglies šiluminėje elektrinėje.

Su elektros energetika siejasi didžiulės ekologijos problemos: kaip mažinti šiluminių elektrinių išmetamų atmosferon kenksmingų degimo produktų kiekį, kaip užtikrinti atominių elektrinių saugumą ir kt.

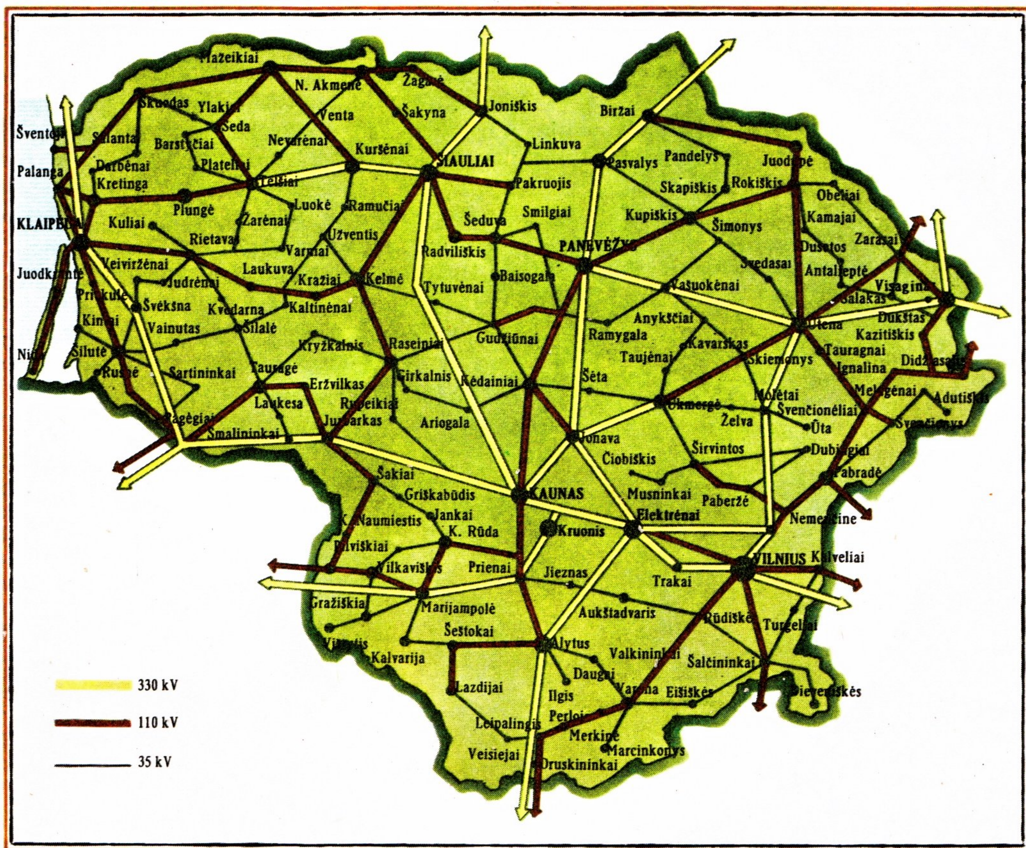
Energetikos milžinai

Ekonomiškai tikslinga statyti elektrines ten, kur yra dideli pigaus kuro ištekliai, ir transportuoti ne kurą, o elektros energiją.

Lietuvos elektrifikacijos pagrindas yra įvežtinis kuras (mazutas, anglis, dujos, atominis). Vietiniai energijos ištekliai — hidroenergija ir durpės — turi tik antraeilę reikšmę.

Didžiausios elektrinės yra Ignalinos atominė — 2300 MW, Elektrėnų valstybinė rajoninė šiluminė — 1800 MW, Kaišiadorių hidroakumuliacinė — 400 MW, Vilniaus termofikacinė — 360 MW, Mažeikių termofikacinė — 250 MW, Kauno termofikacinė — 212 MW, Kauno hidroelektrinė — 100 MW.

Daug ypač stambių elektrinių veikia Rusijoje: Sajanų Šušensko HE prie Jenisiejaus — 6400 MW, didžiausia pasaulyje, Krasnojarsko HE prie Jenisiejaus — 6000 MW, Bratsko HE prie Angaros — 5000 MW ir kt.



43.2 pav.

Kiek kainuoja elektros transportavimas?

Lietuvoje yra per 120 000 km elektros tiekimo linijų. Jomis galima būtų tris kartus apjuosti Žemės rutulį. Perduodant elektros energiją, nuostoliai elektros tinkluose sudaro 11—12%, taigi mūsų respublikoje kasmet prarandama per 2 mlrd. kW·h elektros energijos! Tai dukart daugiau, negu buvo jos pagaminta Lietuvoje 1960 m.

Siekiant sumažinti perduodamos elektros energijos nuostolius, reikia perdavimo linijose, kiek tai įmanoma, mažinti srovės stiprumą. Kadangi išsiskiriantis linijos laiduose šilumos kiekis, pagal Džaulio dėsnį, yra tiesiog proporcingas srovės stiprumo kvadratui ($Q = I^2Rt$), tai, sumažinus srovės stiprumą, pavyzdžiui, 10 kartų, energijos nuostoliai sumažėja 100 kartų. Tačiau mažinti srovės stiprumą ir nekeisti galios galima tik atitinkamai padidinant įtampą. Tą atlieka aukštinantieji transformatoriai. Kuo ilgesnė perdavimo linija, tuo aukštesnė įtampa joje naudojama. Šiuo metu veikia 35, 110, 330, 500, 750 ir 1150 kV aukštos įtampos linijos.

Įtampa elektros energijai transportuoti keliama keliomis pakopomis, o energijos vartojimo vietoje įtampa vėl keliomis pakopomis žeminama.

Lietuvos elektros perdavimo linijų tinklas ir svarbiausios elektrinės parodytos 43.2 paveiksle.

Simas Klaidelė, remdamasis (28.2) formule, tvirtina, kad nuostoliai perdavimo linijose dėl laidų šilimo proporcingi įtampos, o ne srovės stiprumo kvadratui:

$$Q = A = \frac{U^2}{R} t,$$

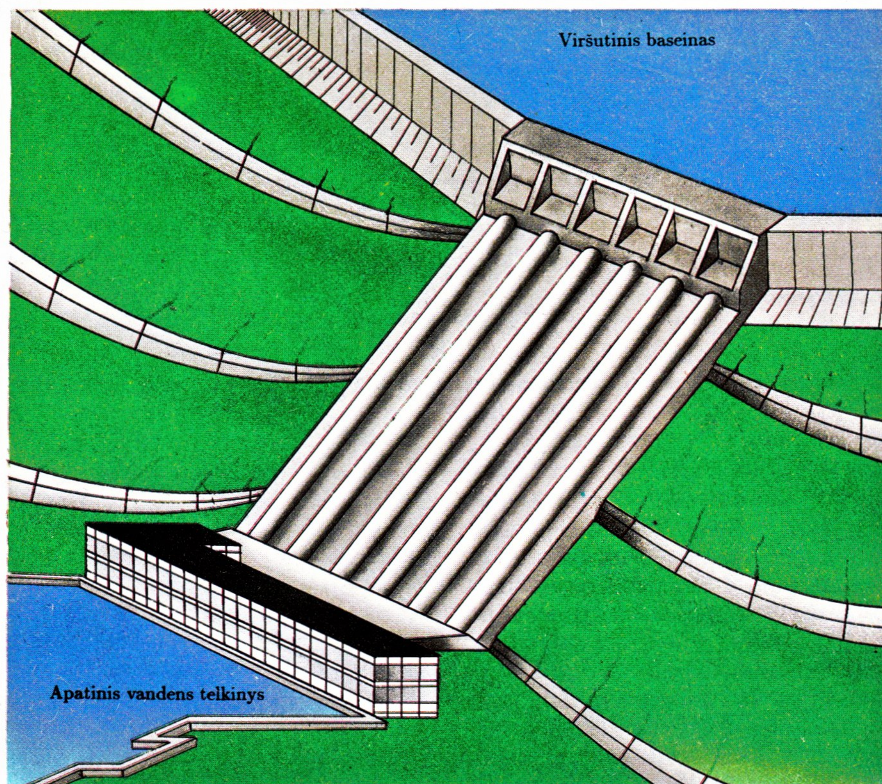
todėl siūlo mažinti perdavimo linijų įtampą. Kodėl energetikų nuomonė priešinga?

---

§ 43.2. Energetinės sistemos

Elektrinės, elektros tinklai ir vartotojai tam tikroje teritorijoje jungiami į **energetines sistemas.** Energetinėje sistemoje galima ekonomiškiau paskirstyti elektrinių apkrovas, sumažinti energijos savikainą, nenutrūkstamai tiekti energiją išėjus iš rikiuotės kuriam nors objektui.

Gretimų rajonų energetinės sistemos jungiamos į *jungtines energetines sistemas*, o pastarosios — į *vieningąją energetinę sistemą*. Ši sistema sujungta su kitų šalių energetinėmis sistemomis.



43.3 pav. Kaišiadorių HAE schema

Lietuvos energetinė sistema įeina į Baltijos šalių *jungtinę energetinę sistemą*, apimančią Baltijos respublikas. Sistemos dispečerinis centras yra Rygoje.

Fabrikai be produkcijos sandėlių

Elektros energija vartojama labai netolygiai. Daugiausia jos suvartojama vakare. Vien tik įjungus vienu metu visus Lietuvos televizorius, reikia papildomai 0,2 mln kW galios. Tai — dviejų Kauno hidroelektrinių pajėgumas! Mažiausiai vartojama energijos naktį, 1—6 val. Tuo metu tenka iš dalies stabdyti elektrines, atjungti generatorius, o tai labai neekonomiška.

Didelėse energetinėse sistemose elektros energijos vartojimui išlyginti statomos **hidroakumuliacinės elektrinės** (HAE). Hidroakumuliacinė elektrinė kitų elektrinių elektros energiją, kai yra jos perteklius, verčia vandens potencine energija — kelia vandenį į viršutinį rezervuarą. Gi vandens potencinė energija, kai reikia, vėl verčiama elektros energija, nes HAE agregatai gali dirbti ir kaip vandens siurbliai, ir kaip hidrogeneratoriai. Kaišiadorių HAE (43.3 pav.) vieno agregato galia 200 MW. Apatinis jos baseinas yra Kauno marios, o viršutinis įrengtas 110 m aukštyje. Vanduo kyla į viršutinį baseiną ir teka atgal į marias 8 m skersmens vamzdžiais.

? *1. Kartais televizijos laidos metu vedantysis paprašo žiūrovus keletui sekundžių išjungti televizorius. Kokiu būdu staigiai sužinomas televizorių, kurių ekranuose žiūrima ta laida, skaičius?*
2. Apskaičiuokite transformatorių, keičiančių standartines įtampas elektros energijos perdavimo linijose (§ 43.1), transformacijos koeficientus.
Tema referatui: „Elektra gintaro krašte“ (MG 1984, N6)

43.1. Kas bus, jeigu transformatorių, apskaičiuotą 127 V įtampai, įjungsime į 110 V nuolatinės srovės grandinę? Kodėl transformatorių n. k. yra daug didesnis už elektros variklių n. k.?

43.2. Prie transformatoriaus pirminės apvijos prijungta 3500 V įtampa. Jo antrinė apvija prijungta jungiamaisiais laidais prie energijos imtuvo. Imtuvo įtampa 220 V, galia 25 kW ir cos $\varphi = 1$. Kokia yra jungiamųjų laidų varža, jeigu transformacijos koeficientas lygus 15? Kokio stiprumo srovė teka transformatoriaus pirmine apvija?

3.4 skyrius
RADIOTECHNIKOS PAGRINDAI

44 paskaita
RADIJO IŠRADIMAS

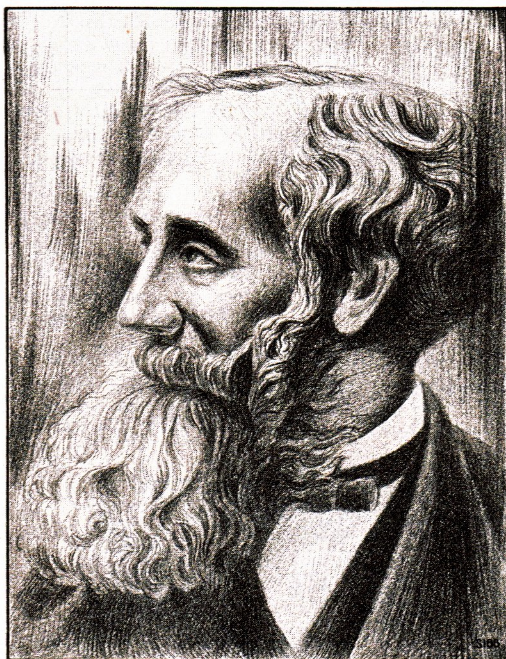
§ 44.1. Radiotechnikos objektas

Šiuolaikinė radiotechnika — tai plati ir daugialypė technikos šaka, apimanti radijo ryšį, televiziją, radiolokaciją, telemechaniką. Veržli radiotechnikos raida ir nuostabūs, į stebuklus panašūs jos laimėjimai rodo glaudžiausią fizikos mokslo ir techninės kūrybos ryšį. Radiotechnika savo ruožtu apginkluoja fizikus tiksliomis ir galingomis tyrimo priemonėmis.

Radiotechnikos skyriumi baigsime elektromagnetizmo kursą.

Radijo išradimas

Iki šiol kalbėjome apie atskirai egzistuojantį elektrinį lauką (pvz., kondensatoriuje) ir magnetinį lauką (pvz., ritėje). Tai — vieningo **elektromagnetinio lauko** dalys. Radijo bangos ir yra sklindantis erdvėje elektromagnetinis laukas. Elektromagnetinio lauko teoriją 1864 m. sukūrė anglų fizikas Džeimsas M a k s v e l i s (1831—1879). 1888 m. įžymus vokiečių fizikas Heinrichas H e r c a s (1857—1894), remdamasis Maksve-



Džeimsas Maksvelis (1831—1879)



Heinrichas Hercas (1857—1894)

lio teorija, eksperimentiškai gavo elektromagnetines bangas ir patvirtino Maksvelio teorijos išvadą, kad jų greitis ore lygus šviesos greičiui ($3 \cdot 10^8$ m/s).

Herco atradimas tapo sensacija. Nors pats Hercas ir netikėjo, kad jo atradimas galėtų būti praktiškai pritaikomas, daugelio šalių mokslininkus užvaldė elektromagnetinių bangų pritaikymo ryšiui idėja. Pirmasis šią idėją įgyvendino rusų fizikas Aleksandras Popovas (1859—1906). 1895 m. gegužės 7 d. Rusijos fizikų draugijos posėdyje Popovas perskaitė pranešimą apie jo išrastą ryšio be laidų sistemą ir pademonstravo jos veikimą 60 m nuotoliu.

Tačiau Popovas negavo iš vyriausybės materialinės paramos savo išradimui tobulinti. Tuo metu pažangesnių Europos šalių vyriausybės greitai įvertino radijo ryšio perspektyvas ir dosniai finansavo darbus tobulinant tokio ryšio aparatūrą. Jau 1896 m. italų inžinierius Guljelmas Markonis (1874—1937) užpatentavo telegramų perdavimą bevieliu telegrafu, o 1901 m. užmezgė radijo ryšį tarp Europos ir Amerikos. 1909 m. už naujos technikos šakos — radiotechnikos — sukūrimą ir tobulinimą Markonis buvo apdovanotas Nobelio premija.

§ 44.2. Elektromagnetinių virpesių susidarymas

Paprasto bandymo nepaprasti rezultatai

Pagrindinė visų radiotechnikos prietaisų dalis yra **virpesių kontūras.** Jį sudaro tarp



Aleksandras Popovas (1859—1906)

savęs sujungti kondensatorius ir induktyvumo ritė (44.1 pav., *a, b*).

Kontūre vykstantiems procesams išsiaiškinti sujunkime grandinę pagal 44.2 paveiksle, *a,* parodytą schemą. Perjungikliu *K* prijunkime kondensatorių *C* prie elektros šaltinio ir jį įkraukime. Tada atjunkime kondensatorių nuo šaltinio ir sujunkime su rezistoriumi, kurio aktyvinė varža *R*. Oscilografo ekrane pamatysime iškrovos signalą — trumpalaikį žybsnį. Taip ir turėjo būti: sujungus grandinę, kondensatorius akimirksniu išsikrovė per rezistorių *R,* sukaupta elektros energija virto šiluma.

Pakartokime bandymą rezistorių pakeitę rite *L* (44.2 pav., *b*). Rezultatas bus gana netikėtas: įkrautą kondensatorių sujungę su rite, oscilografo ekrane stebėsime ne žybtelėjimą, o besitęsiančius silpstančius sinusinius virpesius! Iš kur ėmėsi srovė, kaip galėjo kartotis procesas, kai, grandinę sujungus, kondensatorius išsikrovė?

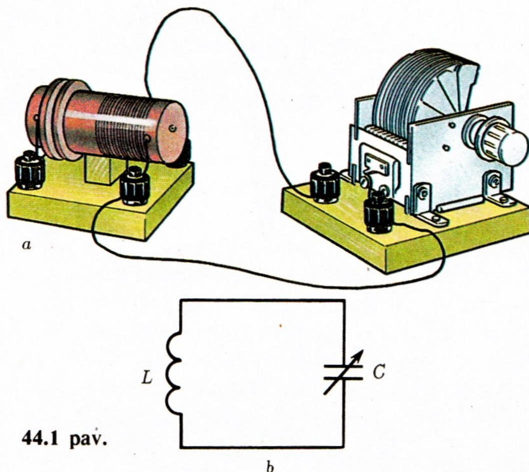
Elektromagnetinė „svyruoklė“

Antrą bandymą (44.2 pav., *b*) panagrinėkime detaliau. Kondensatoriaus išsikrovimo per ritę procesą išskaidykime į 4 etapus:

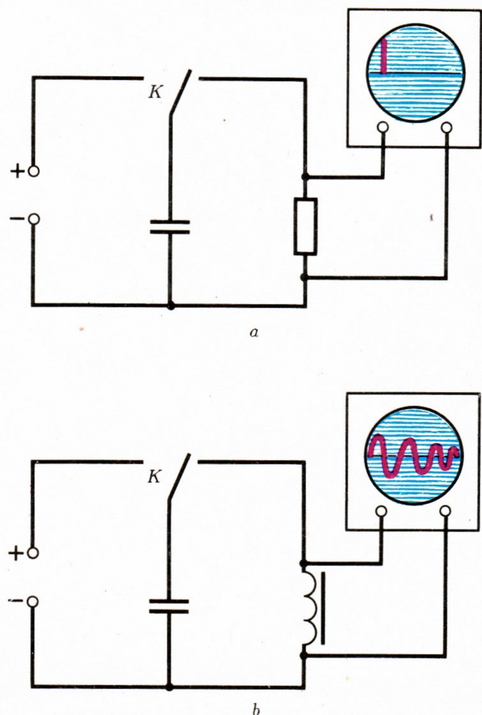
1. Kondensatorius įkrautas iki įtampos U_m, bet kontūro grandinė dar nesujungta. *Tarp kondensatoriaus elektrodų ir artimoje erdvėje yra elektrinis laukas* (44.3 pav., *a*). Elektrinio lauko energija $E_{el} = \frac{CU^2_m}{2}$ (žr. (24.18)).

2. Jungikliu *K* sujungus kontūro grandinę, kondensatorius pradeda išsikrauti per ritę. Srovė stiprėja iki maksimalios I_m palaipsniui, nes veikia priešingos krypties saviindukcijos EVJ. *Tekėdama rite, srovė sukurs ritės viduje ir arti jos magnetinį lauką* (44.3 pav., *b*). Srovei pasiekus vertę I_m, magnetinio lauko energija $E_{magn} = \frac{LI^2_m}{2}$ (žr. (40.4)), o kondensatoriuje krūvio ir elektrinio lauko nėra.

3. Srovė ne išsyk nutrūksta, o toliau



44.1 pav.



44.2 pav.

teka ta pačia kryptimi silpnėdama: silpnėjant magnetiniam laukui, ritėje atsiranda saviindukcijos EVJ, kuri palaiko tos pačios krypties srovę. Indukuotoji srovė įkraus kondensatoriaus elektrodus priešingo ženklo krūviais. *Tarp kondensatoriaus elektrodų ir artimoje erdvėje susidarys elektrinis laukas, tik priešingos krypties* (44.3 pav., *c*).

4. Išnykus magnetiniam laukui ir nutrūkus indukuotajai srovei, kondensatorius vėl pradeda išsikrauti. Procesas kartojasi, tik srovė teka priešinga kryptimi. *Priešingos krypties palaipsniui stiprėjanti srovė, tekėdama rite, kuria priešingos krypties magnetinį lauką* (44.3 pav., *d*). Elektrinio lauko energija vėl virsta magnetinio lauko energija.

Toliau ritės saviindukcinės EVJ palaikoma srovė iš naujo įkraus kondensatorių taip, kaip jis buvo įkrautas pradžioje, ir procesai kartosis ta pačia tvarka. Taigi srovė tokioje grandinėje tekės tai viena, tai kita kryptimi — ji svyruos, kaip ir kintamosios srovės generatoriuje, tik daug didesniu dažniu. Didelio dažnio svyravimus priimta vadinti **virpesiais,** todėl ir aprašytoji grandinė vadinama **virpesių kontūru.**

Virpesių periodas ir dažnis

Elektromagnetiniai virpesiai apibūdinami tais pačiais parametrais, kaip ir kintamoji srovė:

1. Laikas, per kurį įvyksta vienas srovės stiprumo svyravimas — elektromagnetinis virpesys (44.3 pav., *a, b, c, d*), vadinamas virpesių **periodu** (T). Periodas matuojamas sekundėmis.

2. Virpesių skaičius per vieną sekundę vadinamas **dažniu** (ν). Dažnis matuojamas hercais (Hz). Radiotechnikoje tenka susidurti su labai dideliais virpesių dažniais, kurie matuojami kilohercais ir megahercais: 10^3 Hz $= 1$ kHz, 10^6 Hz $= 1$ MHz.

Periodą ir dažnį sieja ryšys: $\nu = 1/T$.

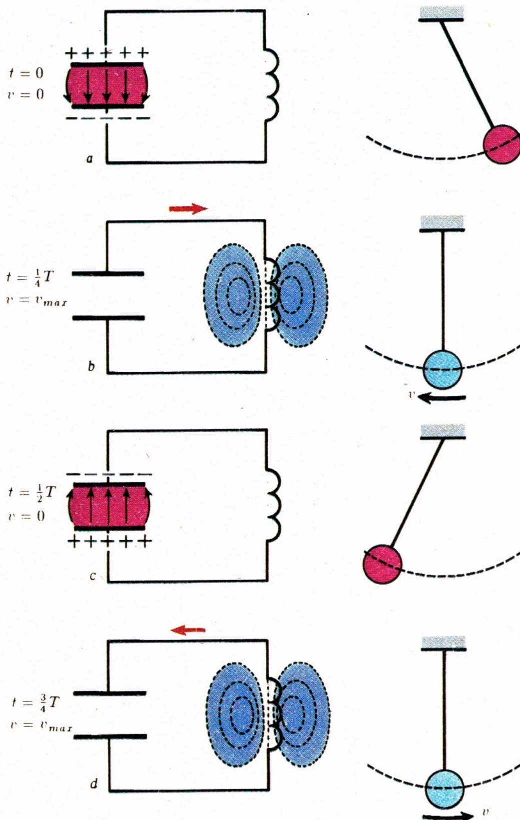
Nuo ko gi priklauso kontūre vykstančių virpesių periodas ir dažnis?

Svarbi radiotechnikos formulė

Tokiu atveju, kai virpesių kontūro aktyvioji varža labai maža ($R \to 0$), laidininkai nešyla ir visa kondensatoriuje sukaupta elektrinio lauko energija virsta magnetinio lauko energija: $E_{el} = E_{magn}$. Tuo remdamiesi galime parašyti: $\frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2}$ arba

$$LI^2 = CU^2. \qquad (44.1)$$

Į šią formulę įrašykime srovės išraišką iš Omo dėsnio grandinės elementui, turinčiam induktyvumą L: $I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi\nu L} = \frac{U}{\frac{2\pi L}{T}}$. Taigi $L\left(\frac{UT}{2\pi L}\right)^2 = CU^2$. Pakėlę



44.3 pav.

kvadratu ir suprastinę, gausime: $\frac{T^2}{4\pi^2 L} = C.$

Iš šios lygybės išreikškime kontūro virpesių periodą T:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (44.2)$$

Pirmasis kontūro virpesių periodo formulę nustatė anglų fizikas Viljamas T o m s o n a s (1824—1907), todėl ji ir pavadinta **Tomsono formule.** Tai — bene svarbiausia radiotechnikai formulė.

44.1. Kaip pasikeis laisvųjų virpesių periodas ir dažnis kontūre, kurio $R = 0$, jeigu induktyvumas padidės dvigubai, o talpa — keturgubai?

44.2. Koks yra savųjų virpesių dažnis kontūre, kurio $R = 0$, induktyvumas 12 mH, o talpa 0,88 μF?

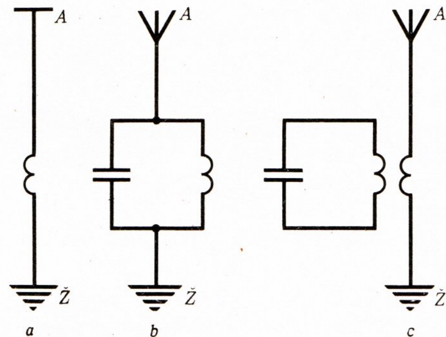
---

§ 44.3. Radijo bangos

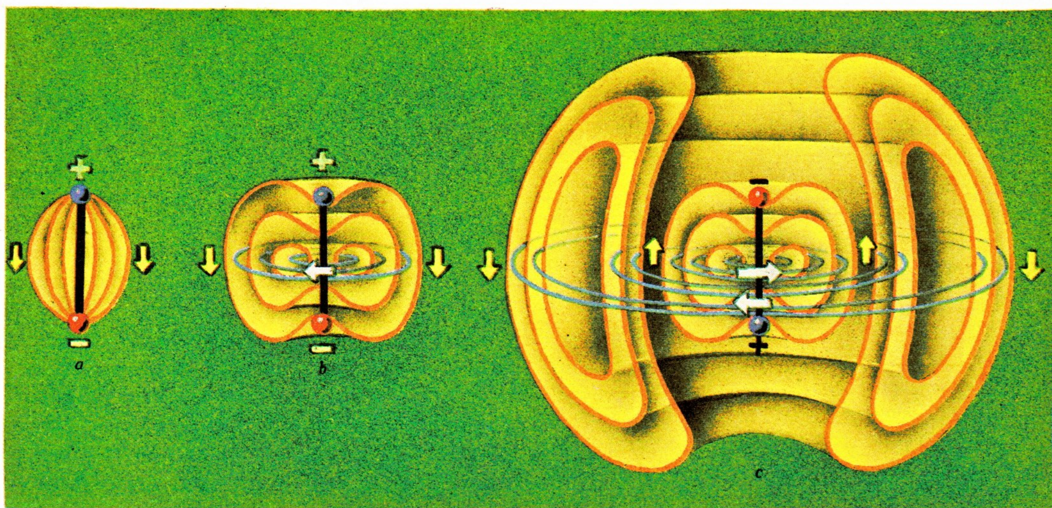
Kaip atverti virpesių kontūrą

Išnagrinėtasis virpesių kontūras (44.1 pav.) vadinamas **uždaruoju.** Tik labai nedidelę virpesių energijos dalį uždarasis kontūras išsklaido į aplinką. Kas kita bus, jei kontūrą „atidarysime" — kondensatoriaus elektrodus nutolinsime vieną nuo kito „nuo žemės iki dangaus", t. y. vieną jų pakeisime įžeminimu *Ž*, o kitą — antena *A* (44.4 pav., *a*). Tokį kontūrą vadiname **atviruoju.** Atvirąjį kontūrą galima sudaryti ir prijungiant prie uždarojo anteną bei įžeminimą (44.4 pav., *b*). Kartais būna patogu virpesių energiją iš uždarojo kontūro perduoti į atvirąjį indukciniu ryšiu, panašiai kaip iš transformatoriaus pirminės apvijos į antrinę (44.4 pav., *c*).

Kas gi vyksta atvirajame kontūre? Žinome, kad kintamoji srovė kuria kintamąjį magnetinį lauką. Tačiau kintamoji srovė egzistuoja todėl, kad laidininke yra kintamasis elektrinis laukas. Tai gal magne-



44.4 pav.



44.5 pav.

tinio lauko kūrėjas — ne vien tik srovė, o ir kintamasis elektrinis laukas? Bandymai rodo, kad taip ir yra: erdvėje apie kintamąjį elektrinį lauką atsiranda kintamasis magnetinis laukas. Apie kintamąjį magnetinį lauką savo ruožtu susidaro kintamasis elektrinis laukas, ir t. t. Toks periodiškai besikeičiantis elektrinis ir magnetinis laukas vadinamas **elektromagnetiniu lauku.** Elektromagnetinio lauko plitimas — tai *elektromagnetinės bangos.* Jų greitis vakuume $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Vadinasi, *atvirasis kontūras spinduliuoja elektromagnetines bangas* (44.5 pav., *a, b, c*). Toldamos nuo kontūro, elektromagnetinės bangos perneša tam tikrą energiją.

Kadangi bangos greitis c yra pastovus, tai per vieną virpesių periodą banga nusklinda vienodą atstumą, vadinamą **bangos ilgiu** (λ):

$$\lambda = cT. \qquad (44.3)$$

Prisiminę periodo ryšį su virpesių dažniu ν (41.7), pastarąją formulę galime perrašyti:

$$\lambda = c/\nu. \qquad (44.4)$$

Ryšiams naudojamos elektromagnetinės bangos vadinamos **radijo bangomis.** Radijo ryšiui naudojamos nuo 10 km iki 1 km ilgio bangos vadinamos *ilgosiomis*, nuo 1 km iki 100 m — *vidutiniosiomis*, nuo 100 m iki 10 m — *trumposiomis* ir nuo 10 m iki 1 cm — *ultratrumposiomis.*

Metalai ir kitos laidžios elektrai medžiagos radijo bangas atspindi; dielektrikai jas praleidžia, nežymiai susilpnindami.

44.3. Kokio ilgio bangas siunčia radijo stotis, veikianti $1{,}5 \cdot 10^3$ kHz dažniu?

44.4. Elektromagnetinis kontūras sukuria vakuume 150 m ilgio elektromagnetines bangas. Kokia yra kontūro talpa, jeigu induktyvumas lygus 0,25 mH, o aktyviosios varžos galima nepaisyti?

? *1. Kodėl saviindukcijos srovė, tekanti kontūru ta pačia kryptimi, kaip kondensatoriaus iškrovos srovė, įkrauna jo elektrodus priešingo ženklo krūviais (§ 44.2)?*
2. Norint geriau suprasti reiškinius, vykstančius virpesių kontūre, patartina juos palyginti su vaizdžiais ir analogiškais mechaniniais svyravi-

mais (44.3 pav.). Kokią energiją kontūre atitinka svyruoklės potencinė ir kinetinė energija?
3. Kodėl sužaibavus sumirga televizoriaus ekranas, o iš radijo imtuvo pasigirsta traškesys?
4. Kur jūs matėte radijo stoties antenas?

44.5. Kokio ilgio elektromagnetines bangas sukuria vakuume virpesių kontūras, kurio talpa 2,6 pF ir induktyvumas 0,012 mH, o virpesiai yra savojo dažnio?

44.6. Kokiam bangų ilgių diapazonui apskaičiuotas imtuvas, kurio priėmimo kontūro induktyvumas lygus 1,5 mH, o talpą galima keisti nuo 75 iki 650 pF? Kontūro aktyvinės varžos nepaisykite.

45 paskaita
ELEKTRINIS REZONANSAS

„Netikėsi, kad tai raidės
Nesuprasi, kas per raštas,
Nežinia kur žodis baigės —
Tik brūkšnelis arba taškas".

Mįslė

§ 45.1. Elektromagnetinių virpesių generatorius

Slopinamieji ir neslopinamieji virpesiai

Vykstant elektromagnetiniams virpesiams realiame kontūre, jų amplitudė dėl šiluminių nuostolių palaipsniui mažėja (45.1 pav., *a*). Tokie virpesiai vadinami **slopinamaisiais.** Kad virpesiai būtų **neslopinamieji** — pastovios amplitudės (45.1 pav., *b*), būtina kompensuoti virpesių energijos nuostolius iš elektros šaltinio imama energija. Radijo ryšiui reikalingus neslopinamus aukšto dažnio virpesius kuria lempinis arba puslaidininkinis prietaisas, vadinamas **aukštojo dažnio generatoriumi** (ADG). Lempinio ADG schema parodyta 45.2 paveiksle.

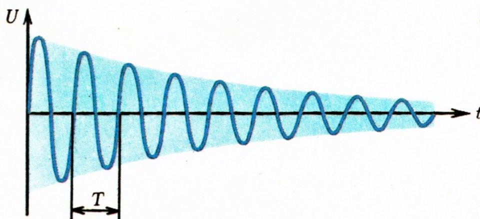
Kaip veikia ADG

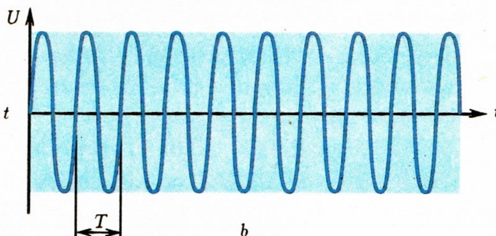
Reikalingas generuojamų virpesių dažnis gaunamas parinkus triodo tinklelio grandinėje įjungto virpesių kontūro parametrus — ritės induktyvumą L ir kondensatoriaus talpą C. Virpesių dažnis

$$\nu = \frac{1}{T} \quad \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (45.1)$$

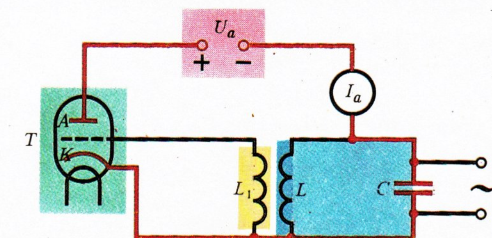
Norint virpesių kontūre palaikyti neslopinamuosius virpesius, reikia kiekvieną periodą papildyti kontūro energiją. Ją teikia srovės šaltinis, palaikantis nuolatinę įtampą U_a tarp triodo anodo ir katodo. Tačiau jo sukurta **anodo srovė** (I_a) turi tekėti į virpesių kontūrą ne visą laiką, o tik kiekvieną virpesių periodą tuo momentu, kai kondensatoriaus elektrodai baigiami įkrauti tos pačios krypties srove. Taip sparčiai ir tiksliai gebantis įjunginėti srovę „jungiklis" ir gali būti lempinis triodas (T) (§ 32.3).

Valdančiuosius signalus, įjungiančius ir išjungiančius srovę, triodas gauna iš paties kontūro per **grįžtamojo ryšio ritę** L_1. Ritė

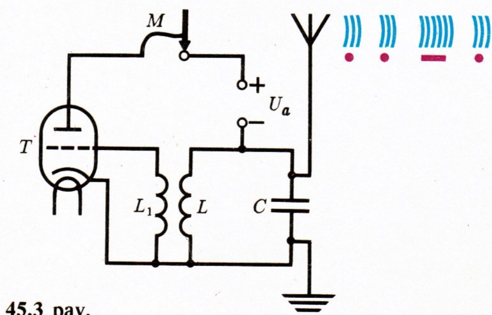




45.1 pav.



45.2 pav.



45.3 pav.

L_1 įjungta į tinklelio grandinę ir yra surišta indukciniu ryšiu su virpesių kontūro rite *L*.

Sujungus anodo grandinę, srovė įkrauna kondensatorių *C*, ir kontūre prasideda virpesiai (44.3 pav., *a, b, c, d*).

Kintamajai srovei tekant kontūro rite *L*, indukuojasi EVJ grįžtamojo ryšio ritėje L_1. Ši EVJ veikia lempos tinklelį: kai tinklelio potencialas katodo atžvilgiu pasidaro neigiamas, anodo srovė nutrūksta — lempa „užsidaro". Kai po pusės periodo lempos tinklelis pasidaro teigiamas, triodas „atsidaro" ir anodo srovė papildo kontūro energijos nuostolius.

Taigi kiekvieną periodą triodas reikiamu momentu automatiškai sujungia elektros šaltinį su virpesių kontūru ir palaiko neslopinamuosius virpesius.

Kaip veikia radiotelegrafas?

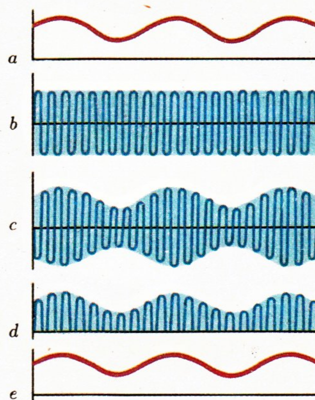
Prie ADG išėjimo gnybtų (~) prijungę atvirą virpesių kontūrą ir anodo grandinėje įjungę srovės nutraukiklį — Morzės raktą (*M*), turėsime paprasčiausią radijo siųstuvą. Juo galima pasiųsti informaciją **Morzės abėcėle** — trumpesniais ir ilgesniais bangų impulsais, atitinkančiais taškus ir brūkšnelius (45.3 pav.)

§ 45.2. Garso perdavimas radijo bangomis

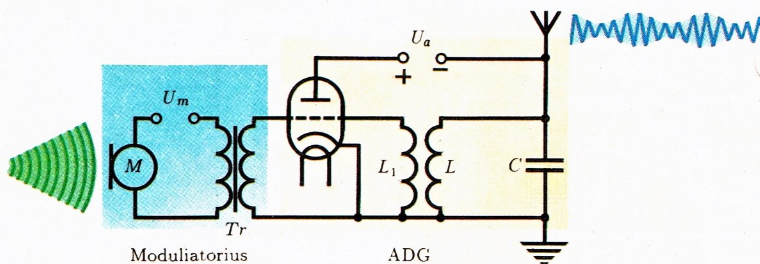
Garso bangai virpinant mikrofono membraną, atitinkamai kinta mikrofono varža ir jo grandine tekanti srovė. Taigi mikrofonas mechaninius garso bangos virpesius pakeičia garsinio dažnio elektriniais virpesiais. Garsų virpesių dažnis yra nuo 16 iki 20 000 Hz. Mikrofono grandinėje atsiranda tokio pat dažnio elektriniai virpesiai, radiotechnikoje vadinami **žemojo dažnio** (ŽD) virpesiais (45.4 pav., *a*). Žemojo dažnio elektriniai virpesiai gali būti perduodami tiktai telefono laidais, nes antenos tokio dažnio radijo bangų nespinduliuoja.

Generatorius + moduliatorius = radijo siųstuvas

Aukštojo dažnio virpesiai (45.4 pav., *b*) gerai spinduliuojami. Vadinasi, į juos, tarsi į laiš-



45.4 pav.



45.5 pav.

ko eilutę, reikia „įrašyti“ žemojo (garsinio) dažnio virpesius. Šis „įrašymas“ vadinamas AD virpesių **moduliavimu.** Paprasčiausiu atveju jis atliekamas šitaip: iš mikrofono (*M*) grandinės ŽD virpesiai perduodami per aukštinantįjį transformatorių (*Tr*) į ADG triodo tinklelio grandinę (45.5 pav.). Tinklelio potencialui kintant garsiniu dažniu, taip pat kinta aukštojo dažnio virpesių, generuojamų anodo grandinėje, amplitudė. Šitaip AD virpesių amplitudė „subanguojama“ pagal garsinius virpesius (45.4 pav., *c*). Aprašytasis procesas vadinamas **amplitudine moduliacija,** o aukšto dažnio elektromagnetiniai virpesiai, kurių amplitudė kinta kitų virpesių dažniu, vadinami **moduliuotaisiais virpesiais.** Siųstuvo dalis, skirta AD virpesių amplitudei keisti pagal perduodamos informacijos (garsinį) signalą, vadinama **moduliatoriumi.**

Moduliuotiems virpesiams veikiant anteną, sklinda taip pat moduliuota radijo banga. Taigi aukštojo dažnio virpesiai „perneša“ savo viršūnėmis garsinę informaciją, todėl radiotechnikoje jie vadinami „nešančiaisiais“.

§ 45.3. Radijo imtuvas

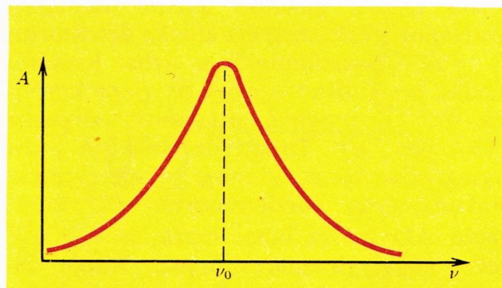
Aparatas, priimantis radijo bangas ir atkuriantis jomis perduodamą garsą, vadinamas **radijo imtuvu.** Kas gi vyksta, kai moduliuota banga pasiekia imtuvo anteną?

Nauja virpesių kontūro tarnyba

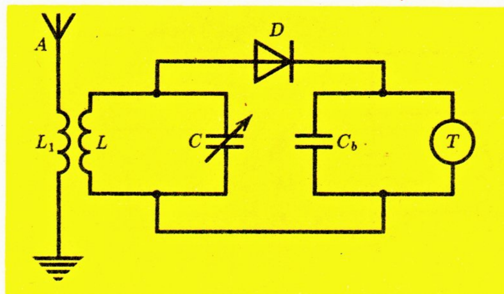
Antena yra surišta indukciniu ryšiu su imtuve esančiu virpesių kontūru, todėl radijo bangos indukuoja tame kontūre tokio pat pavidalo, t. y. moduliuotus (45.4 pav., *c*) elektromagnetinius virpesius. Tačiau kontūrą veria vienu metu įvairių stočių siunčiamos skirtingo nešančiojo dažnio radijo bangos, o kontūras turi išskirti tik vieną stotį — tik jos siučiama banga turi indukuoti virpesius. Kaip gi įvykdoma ši užduotis?

Elektrinis rezonansas

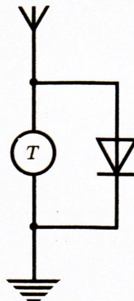
Kiekviename kontūre laisvi elektriniai virpesiai vyksta tam tikru dažniu, aprašomu (45.1) lygybe. Jį vadinsime **savuoju** kontūro dažniu ir žymėsime ν_0. Jeigu bangos indukuotųjų virpesių dažnis ν yra toks pat kaip kontūro savųjų virpesių dažnis ν_0, tai banga kiekvieną periodą papildo virpesių



45.6 pav.



45.7 pav.



45.8 pav.

energiją, virpesių amplitudė maksimaliai padidėja. Šis reiškinys vadinamas **elektriniu rezonansu.**

Banga, kurios dažnis ν smarkiai skiriasi nuo ν_0, „nesusiderina" su kontūru ir virpesių jame praktiškai nesukelia.

Rezonanso reiškinį vaizdžiai rodo kontūro **rezonansinė kreivė** — indukuotųjų virpesių amplitudės priklausomybė nuo kontūrą veikiančių bangų dažnio (45.6 pav.).

Nuo antenos iki garsiakalbio

Radijo imtuvo priėmimo kontūras *LC* (45.7 pav.), kaip minėjome, surištas indukciniu ryšiu su antena *A*. Keičiant kintamos talpos kondensatoriaus talpą *C*, kontūras suderinamas rezonansui su pageidaujamos radijo stoties siunčiamais virpesiais. Iš sužadintų kontūre moduliuotų virpesių (45.4 pav., *c*) reikia išskirti garsinio dažnio virpesius. Svarbiausią vaidmenį čia atlieka **detektorius** *D*. Tai — puslaidininkinis arba lempinis diodas, praleidžiantis srovę tik viena kryptimi. Pro jį praeina „nupjauti" virpesiai (45.4 pav., *d*). Toliau jie išsiskiria į dvi lygiagrečias šakas. Vienoje šakoje įjungtas blokuojantysis kondensatorius C_b, kurio varža AD srovei labai maža, o ŽD srovei — nepalyginamai didesnė. Kitoje šakoje įjungtas telefonas *T* (ausinės), kurio ričių induktyvioji varža, atvirkščiai, tuo didesnė, kuo didesnis dažnis. Todėl AD virpesiai praeina kondensatoriumi C_b, o ŽD (garsiniai) virpesiai (45.4 pav., *e*) teka telefonu ir verčia virpėti jo membraną. Taip elektriniai virpesiai vėl virsta mechaniniais garso virpesiais. Garsinio dažnio elektrinių virpesių išskyrimas iš moduliuotų virpesių vadinamas **detekcija** (45.4 pav., *c, d, e*).

Tokiu būdu telefone atkuriami tokie pat garsiniai virpesiai, kokie veikė radijo siųstuvo mikrofoną.

Atkreipkite dėmesį į tai, kad šio radijo imtuvo konstrukcijoje nėra jokio kito energijos šaltinio be pačių radijo bangų. Toks radijo imtuvas vadinamas **detektoriniu.** Detektorinio imtuvo galia labai maža, laidos gali klausytis tik vienas žmogus pro ausines, bet jį labai nesudėtinga pasidaryti.

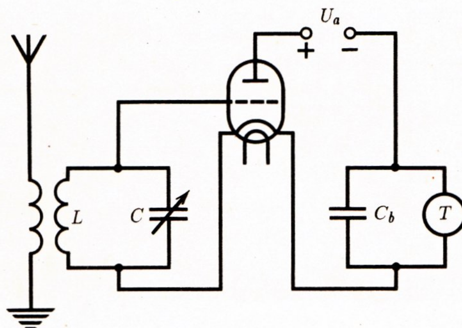

Simas Klaidelė racionalizavo detektorinio radijo imtuvo konstrukciją: paliko jame tik 2 detales (45.8 pav.), o laida girdėti!
Kodėl šiam patobulinimui nebuvo pritarta?


? *1. Sieninis švytuoklinis laikrodis — neslopinamųjų mechaninių virpesių generatorius. Kokios jo dalys yra analogiškos ADG virpesių kontūrui, elektros šaltiniui, triodui ir grįžtamojo ryšio ritei?*
2. ADG schemoje (45.2 pav.) yra 4 elektros grandinės. Parodykite tas grandines ir jų energijos šaltinius.

3. Kuo skiriasi telefono ragelio sandara nuo telefono radijo laidoms klausytis?
4. Kokios bus pasekmės atvirkščiai prijungus šaltinį U_a, U_m (45.5 pav.)?
5. Ką neša „nešantis“ dažnis?

45.1. Kokiu atveju elektromagnetinė banga perduoda jos kelyje esančiam kontūrui daugiausia energijos?

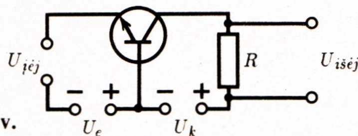
45.2. Morzės abėcėle parašykite savo vardą ir pavardę.



46.1 pav.

46 paskaita

RADIJO RYŠIO PRINCIPAI



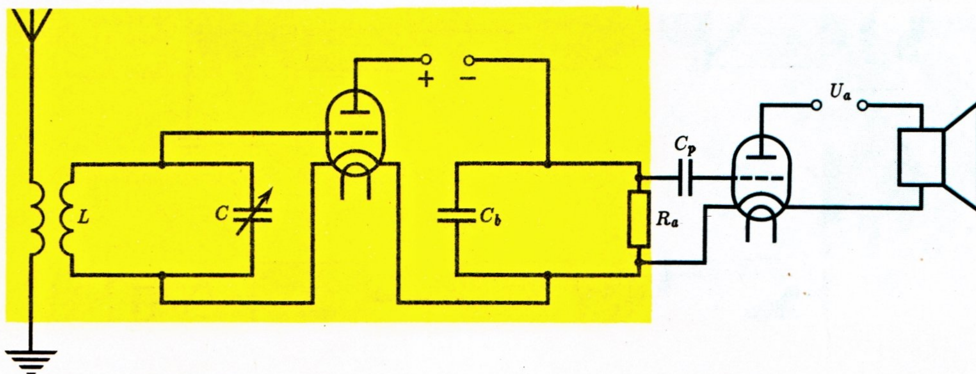
46.2 pav.

§ 46.1. Radijo imtuvai

Ir detektorius, ir stiprintuvas

Detektoriniame radijo imtuve ausines veikia labai silpni elektriniai virpesiai. Todėl šiuolaikiniuose imtuvuose radijo bangų indukuotieji virpesiai būtinai sustiprinami, vartojant pašalinio elektros šaltinio energiją. Kaip veikia stiprintuvas su lempiniu triodu, nagrinėjome § 32.3; jo schema atvaizduota 32.5 paveiksle. Su tranzistoriniu stiprintuvu susipažinome § 34.2, jo veikimą paaiškino 34.3 paveikslas.

Stiprintuvo triodas arba tranzistorius praleidžia srovę tik viena kryptimi, todėl kartu jis atlieka ir imtuvo detektoriaus vaidmenį. Paprasčiausio imtuvo su lempiniu triodu schema parodyta 46.1 paveiksle. 46.2 paveiksle pateikiama tranzistorinio stiprintuvo schema (iš esmės tai 34.3 schemos pakartojimas). Tranzistorinis stiprintu-



46.3 pav.

vas jungiamas per kondensatorių prie imtuvo išėjimo rezistoriaus R_a.

Įėjimo signalą triodas sustiprina 20—80 kartų. Jeigu tokio stiprumo neužtenka, imtuvo išėjimo signalas perduodamas į dar vieno triodo tinklelio — katodo grandinę. Tai jau radijo imtuvas su **dviejų pakopų stiprintuvu** (46.3 pav.). Kad į antrojo triodo tinklelį kartu su stiprinamuoju signalu nepatektų nuolatinė pirmosios pakopos anodo srovė, tinklelio grandinėje įjungiamas skiriamasis kondensatorius C_p. Stiprinamiesiems virpesiams jis nesudaro pastebimos varžos, o nuolatinės srovės nepraleidžia. Jei stiprintuvas sudaromas iš dar daugiau pakopų, šitaip prijungiama ir kiekviena sekanti pakopa.

Daugiapakopiai stiprintuvai naudojami visose radiotechnikos srityse, kur susiduriama su labai silpnais radijo signalais. Pavyzdžiui, palaikant ryšį su nutolusiomis automatinėmis kosminėmis stotimis „Venera“, „Marsas“, nepaprastai silpnus jų radijo signalus stiprino stiprintuvai, sudaryti iš tūkstančių stiprinimo pakopų. Buitiniuose radijo aparatuose pakanka 5—8 stiprinimo pakopų.

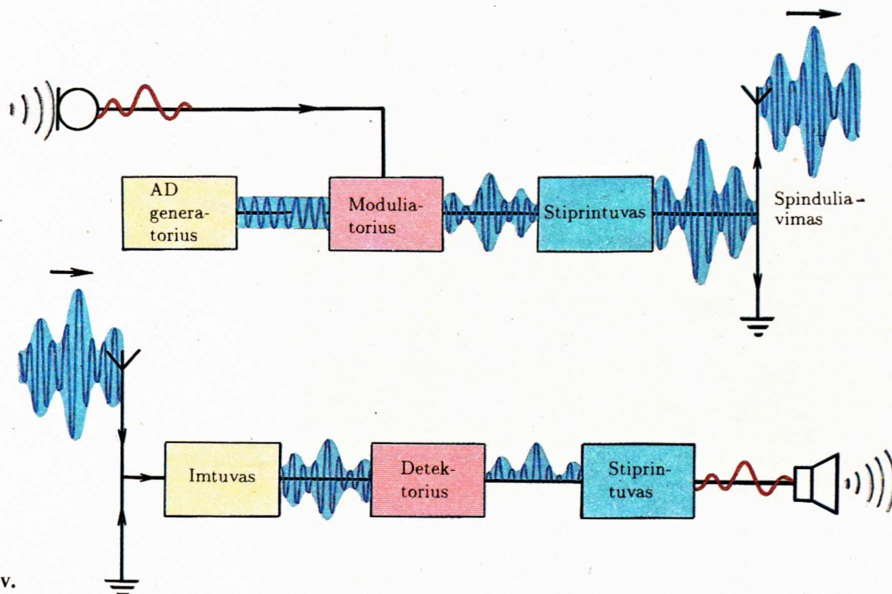
Fizika + braižyba = radiotechnika

Labai svarbu išmokti braižyti ir skaityti radijo schemas. Schemos turi būti braižomos vartojant standartinius sutartinius ženklus (46.1 lentelė) ir laikantis braižybos taisyklių.

46.1. Nubraižykite radijo imtuvo su dviejų pakopų tranzistoriniu stiprintuvu schemą.

§ 46.2. Radijo ryšio principinė schema

Susumavus visa tai, ką sužinojome šiame skyriuje, galima sudaryti bendrą viso radijo ryšio schemą — nuo garso, kuris virpina siųstuvo mikrofoną, iki to paties garso,



46.4 pav.

46.1 lentelė. Sutartiniai ženklai radijo ir elektronikos schemose

Schemos elemento pavadinimas	Sutartiniai ženklai pagal galiojantį standartą	Sutartiniai ženklai ankstesniuose leidiniuose
Ritė		
Kondensatorius		
Antena		
Įžeminimas		
Mikrofonas	M	M
Telefonas	T	
Garsiakalbis		
Diodas		
Triodas		
Puslaidininkinis diodas		
Tranzistorius		
Korpusas		
Prasilenkiantys laidai		
Grandinės mazgas		

atgaminto už šimtų kilometrų radijo imtuvo garsiakalbio. Schema, kurioje nėra aparatūros detalių, o tik abstrakčiai atvaizduotos pagrindinės siųstuvo ir imtuvo dalys, vadinama *struktūrine* schema.

Radijo ryšio struktūrinė schema atvaizduota 46.4 paveiksle.

▲ **46.2.** Kodėl automobilio radijo imtuvas blogai veikia važiuojant po estakada arba tiltu?

▲ **46.3.** Remdamiesi 46.4 paveikslo viršuje atvaizduotąja siųstuvo struktūrine schema nubraižykite detalią jo schemą. Stiprintuvą konstruokite lempinį, vienos (▲) arba dviejų (▲) pakopų.

? *1. Kodėl radijo bangos nepraeina pro metalą?*
2. Remdamiesi 46.2 paveikslo schema, paaiškinkite, kodėl, sukdami rankenėlę, vietoj vienos radijo stoties priimame kitos stoties laidą?
3. Nubraižykite atitinkančią 46.3 paveikslą struktūrinę schemą.

■ **46.4.** Pagal 46.4 paveiksle atvaizduotą struktūrinę schemą nubraižykite detalią radioschemą.

---

47 paskaita

RADIJO BANGOS — NE RADIJUI

Radijo bangos naudojamos ne vien radijo ryšiui, bet ir daugeliui kitų tikslų: tolimiems objektams valdyti (radiovaldymas), objektams aptikti ir jų buvimo vietai nustatyti (radiolokacija), vaizdams perduoti (televizija), kosminiams kūnams tirti (radioastronomija) ir kt. Radijo bangas skleidžia taip pat ne vien radijo siųstuvai. Gamtoje yra daug natūralių radijo bangų šaltinių: Saulė, žvaigždės, žaibai ir kt. Trumpai apžvelgsime kai kuriuos šių pritaikymų.

§ 47.1. Radiolokacija

Lokatoriumi vadinamas įtaisas įvairių objektų buvimo vietai nustatyti. **Radiolokatorius**, arba **radaras** — tai įrenginys objektams aptikti ir jų buvimo vietai nustatyti naudojant kryptingą radijo signalų spinduliavimą ir atspindėtų signalų priėmimą. Radiolokatoriais nustatomos objektų koordinatės erdvėje, jų judėjimo kryptys ir greičiai.

Kaip veikia radaras

Radiolokatorių sudaro galingas ultratrumpųjų radijo bangų siųstuvas ir labai jautrus imtuvas, suderintas to paties dažnio bangoms priimti. Siuntimo ir priėmimo antena yra bendra. Būdama paraboloido formos, ji spinduliuoja labai siaurą radijo bangų pluoštą — *radijo spindulį* (47.1 pav.). Radijo spindulys siunčiamas periodiškais impulsais, trunkančiais apie 10^{-6} s. Pasiuntusi impulsą, radaro antena automatiškai persijungia į imtuvo režimą ir 10^{-3}—10^{-4} s laukia sugrįžtant atsispindėjusio signalo. Per tą pertrauką radijo signalas spėja pasiekti tolimą objektą ir sugrįžti. Atstumas S iki signalą atspindėjusio objekto nustatomas matuojant laiką, praėjusį nuo impulso pasiuntimo iki priėmimo:

$$S=\frac{ct}{2}; \qquad (47.1)$$

čia c — signalo sklidimo greitis ore. Objekto kryptį rodo antenos orientacija signalo priėmimo momentu. Informaciją apdoroja laiko registratoriai ir kompiuteriai, o rezultatai perduodami į televizoriaus ekraną arba skaitmeninį tablo.

Radaro antena yra judri. Pavyzdžiui, laivo radaro antena sukiojasi horizontaliai ir stebi jūros plotą laivo judėjimo kryptimi. Lėktuvų ieškantys radarai juda spirale ir „apžiūri“ visas dangaus sritis.

Vieni kūnai arba jų dalys elektromagnetines bangas atspindi stipriau, kiti — silp-



47.1 pav.

niau, todėl į lokatorių sugrįžta skirtingo stiprumo impulsai ir ekrane atsiranda įvairaus šviesumo taškai. Susilieję taškai sudaro aiškiai matomą vaizdą, kuriame galima atpažinti stebimą vietovę, laivus, lėktuvus ir kt.

Radarų tarnyba

Radarai „stebi" aplinką bet kuriuo paros metu ir bet kokiomis meteorologinėmis sąlygomis. Jų dėka saugiai skraido lėktuvai ir plaukioja laivai naktimis ir per rūką. Radarai seka kosminių laivų kelią. Priešlėktuvinės gynybos radarai kontroliuoja oro erdvę šimtų kilometrų nuotoliu. Radaro spindulio kryptimi galima automatiškai nutaikyti raketas arba zenitinius pabūklus.

Radarais fiksuojami krintantys meteorai, matuojamas jų greitis ir judėjimo kryptis. 1946 m. JAV ir Vengrijoje radiolokaciniais metodais buvo išmatuotas atstumas iki Mėnulio. 1961 m. Sovietų Sąjungos mokslininkai atliko Veneros radiolokaciją. Dabar jau atlikti ir kitų Saulės sistemos planetų radiolokaciniai tyrimai.

▲ **47.1.** Kodėl radiolokatoriaus siųstuvas turi siųsti radijo signalus trumpais impulsais, o ne nuolatos?

§ 47.2. Televizija

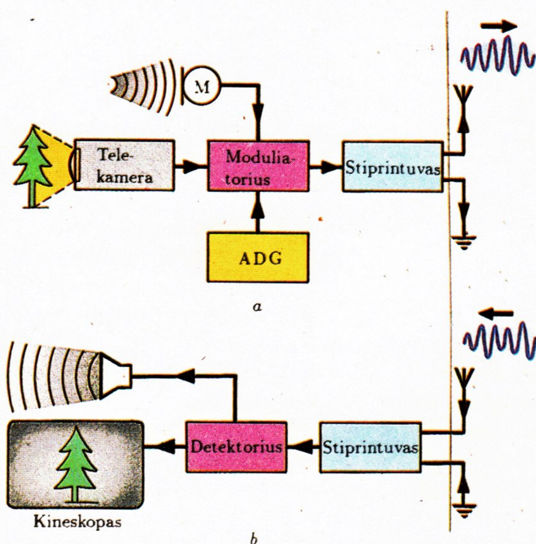
Trys „įrašai" AD virpesiuose

Televizija — vaizdų perdavimas radijo bangomis. Jos struktūrinė schema iš esmės yra tokia pat kaip ir radijo ryšio schema (46.4 pav.). Tačiau televizijos siųstuvas moduliuoja nešančiojo dažnio virpesius trejopais signalais: vaizdo, garso ir valdymo. Pastarieji valdo piešiančio vaizdą elektroninio spindulio judėjimą televizoriaus ekranu (žr. § 32.4, 32.7 pav.).

Stulbinanti veikimo sparta

Vaizdo signalus, arba **videosignalus,** formuoja televizijos kamera. Perduodamas vaizdas kameroje suprojektuojamas į specialaus elektroninio vamzdžio (vidikono, supervidikono ar kitokio) ekraną, sudarytą iš daugybės šviesai jautrių elementų. Lietuvoje naudojamoje televizijos sistemoje jie išdėstyti 625 eilutėmis po 833 elementus eilutėje. Kiekvienas elementas įsielektrina proporcingai apšviestumui, taigi optinis vaizdas virsta elektriniu. Pastarąjį „skaito" eilutė po eilutės vamzdžio elektroninis spindulys. Taip gaunami elektriniai impulsai — videosignalai. Vienam kadrui perduoti jų siunčiama $833 \times 625 = 520\,625$, t. y. daugiau nei pusė milijono! Tik taip gaunamas pakankamai ryškus vaizdas televizoriaus ekrane.

Žmogus sugeba įsiminti regėjimo pojūčius. Kiekvienas kadras išlieka mūsų sąmonėje maždaug 1/16 s. Kai ekrane nejudantys kadrai keičiasi dažniau, juos suvokiame ne atskirai vieną po kito, o kaip nenutrūkstamą judantį vaizdą. Televizijoje priimtas



47.2 pav.

kadrų keitimo dažnis — 25 kadrai per sekundę. Jo užtenka, kad atkuriamas vaizdas nemirgėtų, kad būtų stabilus ir vaizdas, ir jį lydintis garsas. Taigi televizijos kamera per sekundę sukuria ir išsiunčia neįtikėtiną skaičių informacijos elementų: 25× ×520 625=13 015 625 — daugiau nei 13 milijonų videosignalų!

Iš kameros videosignalai perduodami į televizijos siųstuvą, kuris jais moduliuoja nešančiojo dažnio virpesius, moduliuotus virpesius sustiprina ir išspinduliuoja siuntimo antenomis atitinkamas radijo bangas (47.2 pav., *a*).

Kaip veikia televizorius

Televizijos imtuvo — televizoriaus — ekrane vaizdą atkuria elektroninis vamzdis **kineskopas** (§ 32.4). Specialus skleidimo įtaisas vedžioja elektroninį spindulį eilutėmis po kineskopo ekraną tiksliai suderintai su eilutėmis televizijos kameroje. Spindulio intensyvumą kiekviename taške valdo atitinkamas videosignalas, todėl įvairūs ekrano taškai švyti skirtingai. Taip televizoriuje videosignalai vėl paverčiami įvairaus šviesumo švytinčiais taškais, ta pačia tvarka išsidėsčiusiais ekrane. Dėl regos pojūčio inercijos žiūrovas mato ekrane ištisinį judantį vaizdą (47.2 pav., *b*).

§ 47.3. Radioastronomija

Ką tiria „žvaigždžių fizika“

Žinių apie dangaus kūnus svarbiausias šaltinis yra jų skleidžiami šviesos spinduliai ir radijo bangos. Astronomijos šaka, analizuojanti kosminių kūnų išspinduliuotas arba atspindėtas radijo bangas, vadinama **radioastronomija.** Radioastronomijos rezultatus aiškina astrofizika (gr. „žvaigždžių fizika“) — astronomijos šaka, tirianti fizikiniais meto-



47.3 pav.

dais kosminių objektų sandarą, judėjimą ir cheminę sudėtį, fizikines savybes, kilmę ir evoliuciją.

Galingas astrofizikos ginklas

Kosminių šaltinių radijo spinduliavimas tiriamas **radioteleskopais.** Radioteleskopai turi milžiniškus parabolinius arba sferinius „veidrodžius" — antenas, pagamintas iš metalinio tinklo. Antenos sutelkia radijo bangas iš didelio ploto į vieną vietą — židinį,— kuriame sumontuota antrinė antena, perduodanti radijo signalus į imtuvą.

Pirmąjį radioteleskopą kosminėms radijo bangoms tirti 1937 m. sukonstravo amerikiečių astrofizikas G. R e b e r i s.

Radioteleskopai montuojami su judamais arba nejudamais „veidrodžiais" (47.3 pav.). Didžiausias pasaulyje radioteleskopas su nejudamu „veidrodžiu" yra Puerto Riko saloje. Jo 300 m skersmens antena sumontuota užgesusio ugnikalnio krateryje.

Radioteleskopai, turintys didelio ploto antenas, yra daug kartų jautresni už optinius teleskopus ir padeda kur kas toliau prasiskverbti į Visatą. Šiuolaikiniais radioteleskopais pastebimi objektai, nutolę per milijardus šviesmečių. Kadangi dalį kosminių radijo bangų sugeria atmosfera, radioteleskopai įrengiami ir kosminėse stotyse.

Kas siunčia radijo signalus?

Žvaigždės, galaktikos, kosminiai ūkai spinduliuoja radijo bangas dėl įvairių jose vykstančių procesų. Šios bangos praneša apie kosmines katastrofas — sprogimus, tolimų galaktikų susidūrimus ir kt. Periodiškus radijo bangų impulsus skleidžia greitai besisukančios apie savo ašį žvaigždės *pulsarai*. Pulsarų spinduliavimo energijos šaltinis — žvaigždės sukimosi kinetinė energija. Intensyviu radijo ir optiniu spinduliavimu pasižymi „radijo žvaigždės" *kvazarai*. Tai tolimiausi astronomų matomi Visatos objektai, kurių kilmė ir sandara dar apsupti paslapties skraiste.

Radioastronomija nepaprastai išplėtė mūsų žinias apie dangaus kūnus. Iš Visatos gelmių pradėta gauti nauja informacija atskleidė iki šiol nežinomas dangaus kūnų savybes. Radioastronomija padėjo atrasti naujus Visatos objektus, nustatyti galaktikų formas, tirti kosmose vykstančius fizikinius procesus. Radioastronomija turi ir praktinę reikšmę. Pavyzdžiui, iš Saulės radiospinduliavimo stebėjimų numatomos magnetinės audros ir radijo ryšio sutrikimai.

?

1. Pagalvokite, kaip galima radiolokatoriumi nustatyti judančio objekto greitį.

2. Koks yra radiolokatoriaus veikimo spindulys, jeigu pauzė tarp impulsų trunka 10^{-3} s?

3. Kuo labiausiai skiriasi vaizdas, atkuriamas kino ir televizoriaus ekrane?

4. Fotografuojant televizoriaus ekraną trumpu išlaikymu, užfiksuojama tik dalis matomo vaizdo. Kodėl?

5. Ar yra esminių skirtumų tarp radijo bangų sklidimo sąlygų Žemėje ir Mėnulyje?

Tema referatui: *„Ryšių priemonių plėtojimas".*

4 dalis
OPTIKA

4.1 skyrius
ŠVIESOS PRIGIMTIS

48 paskaita
DIDŽIOJI GAMTOS MĮSLĖ

„Aš sutikčiau visą gyvenimą praleisti tamsoje, kad tik sužinočiau, kas tai yra šviesa...“

Galileo Galilėjus

§ 48.1. Mokslo apie šviesą raida

Pažintį su šviesos reiškiniais jau pradėjote mokydamiesi **geometrinę optiką** — šviesos tiesiaeigio sklidimo, jos atspindžio ir lūžimo dėsnius ir šių dėsnių pritaikymus veidrodžiams, lęšiams, iš jų sudarytiems aparatams. Išmokote braižyti atvaizdus, kuriuos sudaro lęšiai, projekciniai aparatai, mikroskopai, teleskopai ir žmogaus akis — panaši į fotoaparatą optine sistema.

Šiame optikos kurse gilinsimės į gana sudėtingas ir prieštaringas šviesos prigimties ir šviesos savybių problemas.

Truputis istorijos

Šviesa, vaidinanti didžiulį vaidmenį žmogaus gyvenime, nuo seniausių laikų traukė jo dėmesį ir žadino vaizduotę. Senųjų religijų dievai sėdėjo ugnies sostuose, važinėjo ugniniais vežimais ir baudė žmones liepsnos rykštėmis. Senovės inkai ir egiptiečiai dievino Saulę. Ir lietuvių pagoniškoji mitologija susijusi su dangaus šviesuliais. Šventa buvo laikoma ugnis, vaidilučių kurstoma ir saugoma romuvose. Net krikščionių švenčių — Velykų, Kalėdų — tradicijose randame Saulės garbinimo pėdsakų. Nenuostabu, kad nuo seniausių laikų ir gamtos tyrinėtojų protą pavergė šviesos prigimties, jos atsiradimo ir sklidimo mįslės. Dar prieš mūsų erą senovės graikų filosofai Pitagoras, Aristotelis ir Euklidas skelbė savo samprotavimus apie šviesos prigimtį.

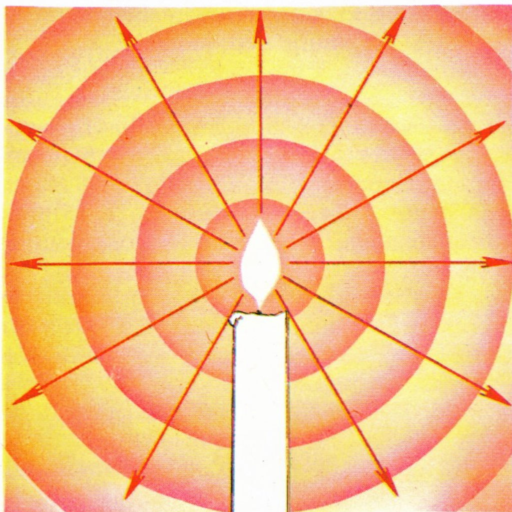
Korpuskulinė šviesos teorija

Pirmąją mokslišką šviesos teoriją sukūrė Izaokas Niutonas (1643—1727). Niutonas teigė, kad šviesa sudaryta iš labai mažų ir greitai judančių medžiagos dalelių — **korpuskulų.** Šviečiantis kūnas skleidžia korpuskulas į visas puses tiesiomis linijomis. Patekus korpuskuloms į akis, matomas jų šaltinis. Remiantis šia teorija, spalvos buvo aiškinamos nevienodu korpuskulų dydžiu, apšviestų kūnų matymas — šviesos atspindžiu nuo jų paviršiaus: korpuskulos atšoka nuo kieto paviršiaus tarsi tamprūs rutuliukai.

Banginė šviesos teorija

Netrukus 1690 m. olandų fizikas Kristianas Heigensas (1629—1695) išleido knygą „Traktatas apie šviesą“, kurioje kritikavo korpuskulinę teoriją ir paskelbė banginės šviesos teorijos principus. „Jeigu šviesa susideda iš korpuskulų,— rašė Hiuigensas,— tai kaip gali būti, kad du susikertantys šviesos pluoštai praeina nesusidurdami ir neišsisklaidydami vienas per kitą?“

Heigensas teigė, kad šviesos bangos yra energijos, o ne materijos sklidimo procesas. Šviečiantis kūnas sukelia ypatingos



48.1 pav.

hipotetinės aplinkos — *eterio* — svyravimus. Eteris, anot Heigenso, yra besvorė, nesuvokiama pojūčiais, tačiau tampri aplinka, užpildanti pasaulio erdvę ir tarpus tarp medžiagos dalelių.

Šviesa plinta eteriu panašiai kaip garsas oru arba bangos vandens paviršiumi (48.1 pav.). Pasiekusios mūsų akis, eterio bangos sukelia regėjimo pojūtį. Spalvų įvairumą Heigensas aiškino nevienodu eterio bangų ilgiu, panašiai kaip garso tonai aiškinami skirtingu garso bangų ilgiu.

Banginė teorija įtikinamai paaiškino kai kuriuos reiškinius, susijusius su šviesos sklidimu, tarp jų ir šviesos pluoštų susikirtimą: bangos vandens paviršiuje laisvai sklinda vienos per kitas. Tačiau ši teorija anuo metu negalėjo paaiškinti tiesiaeigio šviesos sklidimo.

Niutonas ryžtingai stojo prieš banginę šviesos teoriją. „Nežinoma nei vieno atvejo, kad šviesa, kaip garsas arba bangos vandens paviršiuje, užlinktų į šešėlio vidų ir mes matytume, kas darosi už kampo“,— ironizavo Niutonas. Tačiau vėliau, XIX a. pradžioje, toks šviesos „užlinkimas už kampo“ — difrakcija — buvo atrastas. Pergalė krypo banginės šviesos teorijos pusėn, bet kėlė daug abejonių prieštaringos eterio savybės.

Pirmieji korpuskulinis ir banginis šviesos modeliai, nors šiandien ir atrodo primityvūs, atliko svarbų vaidmenį fizikos istorijoje ir padėjo suprasti šviesos reiškinius.

§ 48.2. Elektromagnetinė šviesos prigimtis

Banginės teorijos triumfas

Sukūręs elektromagnetinio lauko teoriją, Dž. Maksvelis atkreipė dėmesį į tai, kad elektromagnetinės bangos sklinda erdvėje šviesos greičiu. Tai buvo pagrindas paskelbti hipotezę, kad *šviesa yra elektromagnetinės bangos*. Vėlesni H. Herco ir P. Lebedevo eksperimentai patvirtino visišką elektromagnetinių bangų ir šviesos savybių tapatumą.

Akis — „fotoaparatas“ ir „radijo imtuvas“

Žmogus suvokia kaip šviesą ir spalvas tik tas elektromagnetines bangas, kurių ilgis yra nuo 400 nm (violetinė spalva) iki 760 nm (raudona spalva). Kiekvienas bangos ilgis iš šio tarpo atitinka konkrečią spalvą arba atspalvį, taigi tiksliausiai spalvą galima nurodyti ne žodžiais, o skaičiumi. Visų spalvų spindulių mišinį žmogus suvokia kaip baltą šviesą.

Žinant šviesos bangos ilgį, galima apskaičiuoti ir spinduliavimo dažnį:

$$\nu = c/\lambda.$$

Elektromagnetinė šviesos teorija gerai paaiškino visus tuo metu žinotus šviesos reiškinius.

§ 48.3. Fotoninė šviesos teorija

„Atominė" šviesos struktūra

Banginės šviesos teorijos šalininkai triumfavo neilgai. Netruko paaiškėti, kad ši teorija negali paaiškinti naujai atrastų šviesos savybių.

Vokiečių fizikas Maksas Plankas (1858—1947), tyrinėdamas įkaitusių kūnų spinduliavimą, atrado dėsningumus, kurių niekaip negalėjo paaiškinti elektromagnetinių bangų teorija. Su kitu nesuprantamu reiškiniu buvo susidurta tyrinėjant *fotoefektą* — elektronų išmušimą iš metalo paviršiaus veikiant šviesos spinduliams (§ 56.1). Buvo nustatyta, kad išmuštųjų elektronų greitis, taigi ir energija, nepriklauso nuo šviesos stiprumo, o priklauso tik nuo šviesos spalvos! Visa tai prieštaravo banginei šviesos teorijai. Ja remiantis neįmanoma buvo paaiškinti, kodėl skirtingo ilgio bangos nevienodai veikia medžiagas ir suteikia elektronams nevienodą energiją. Užėjo sunkūs „fizikos krizės" laikai.

Išeitį iš šios aklavietės 1900 m. pasiūlė pats M. Plankas, paskelbdamas prielaidą, kad šviesos šaltinis spinduliuoja energiją ne ištisai, o tam tikromis porcijomis — **kvantais** (lot. *quantum* — kiek). Kvantų energija ε nevienoda — ji proporcinga šviesos virpesių dažniui:

$$\varepsilon = h\nu. \qquad (48.1)$$

Šioje formulėje esantis proporcingumo koeficientas h vadinamas **Planko konstanta.** Buvo apskaičiuota, kad jis lygus

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}.$$

Žinodami, kad $\nu = c/\lambda$, galime parašyti:

$$\varepsilon = hc/\lambda. \qquad (48.2)$$

Kvanto energija atvirkščiai proporcinga šviesos bangos ilgiui.

Kvantinę šviesos teoriją toliau plėtojo Albertas Einšteinas (1879—1955). Jis pareiškė mintį, kad atominė struktūra būdinga ne vien medžiagai — egzistuoja ir savotiški „šviesos atomai". Į išspinduliuotą energijos kvantą galima žiūrėti kaip į savotišką šviesos dalelę **fotoną.** Remdamasis fotonų samprata, A. Einšteinas 1905 m. paaiškino fotoefektą ir kitus reiškinius, kurių negalėjo paaiškinti elektromagnetinė šviesos teorija.

Už fotoninės šviesos teorijos sukūrimą ir jos pritaikymą M. Plankas (1918 m.) ir A. Einšteinas (1921 m.) buvo apdovanoti Nobelio premijomis.

Dvi fotono savybės

1. *Fotonas egzistuoja tik judėdamas šviesos greičiu.* Nei sulėtinti, nei padidinti fotono greičio negalima.

2. *Fotonas neturi rimties masės.* Atsiradęs jis iš karto įgauna šviesos greitį. Ši savybė skiria fotonus nuo kitų medžiagos dalelių.

Tai kas gi ta šviesa?

Plankas ir Einšteinas, regis, vėl atgaivino Niutono korpuskulinę šviesos teoriją. Fotoninės teorijos pasiekimai iš pagrindų pakeitė ankstesnes pažiūras į šviesą. Paaiškėjo, kad šviesos negalima vaizduotis nei vien tik kaip bangų, nei vien tik kaip dalelių, nes jai būdingos ir vienokios, ir kitokios savybės. Šį ryšį gvildena ir aprašo matematiškai *kvantinė teorija.* Vienuose reiškiniuose labiau išryškėja banginės šviesos savybės, taigi jiems aiškinti tinka banginis modelis. Kituose reiškiniuose, atvirkščiai, lemiamą vaidmenį vaidina šviesos korpuskulinės savybės. Dvilypė šviesos prigimtis, vadinama **bangos — dalelės dvejopumu,** buvo vartai į stebėtiną kvantinių reiškinių pasaulį.

▲ **48.1.** Žinoma, kad žmogui sukelia šviesos pojūtį spinduliai, kurių dažnis nuo $4 \cdot 10^{14}$ Hz (raudoni) iki $7{,}5 \cdot 10^{14}$ Hz (violetiniai). Kokį intervalą užima tų spindulių bangų ilgiai vakuume?

Kiek violetinių spindulių fotonų energija didesnė už raudonų?

48.2. Ką galite pasakyti apie virpesių fazes dviejuose šviesos spindulio taškuose, atstumas tarp kurių lygus 3λ, $2n \cdot \lambda/2$ (čia n — sveikasis skaičius)?

---

§ 48.4. Šviesos greičio nustatymas

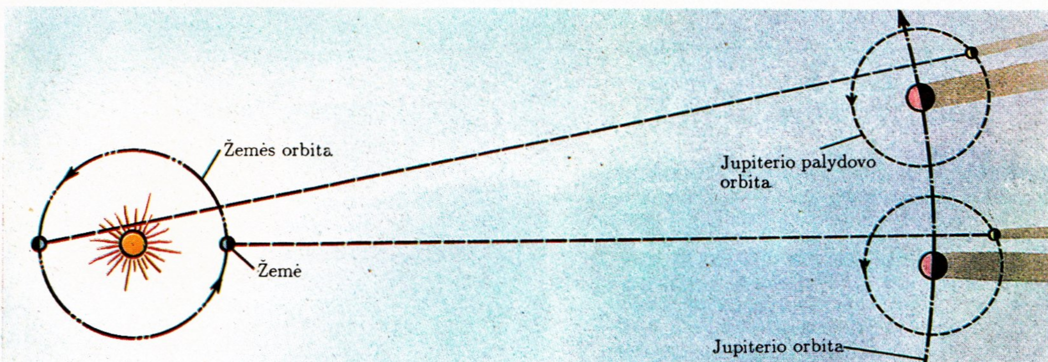
Ilgą laiką buvo manyta, kad šviesai sklisti visai nereikalingas laikas, net buvo ieškota būdų įrodyti, kad šviesa plinta begaliniu greičiu. Niutonas ir Heigensas jau prieštaravo šiai nuostatai. Jų nuomone, nei dalelė, nei banga negali įveikti bet kokį atstumą per laiko tarpą, lygų nuliui.

Šviesos greitis nepaprastai didelis: per vieną milijonąją sekundės dalį šviesa įveikia 300 m nuotolį, o per sekundę gali apskrieti Žemės rutulį 7,5 karto. Kad šviesos sklidimas truktų pastebimą laiką, reikia astronominių atstumų. Štai kodėl šviesos greitis pirmą kartą buvo išmatuotas remiantis būtent astronominiais stebėjimais.

Klaida Jupiterio kalendoriuje

1676 m. danų astronomas Olas Riomeris stebėjo vieno Jupiterio palydovo užtemimus. Žemės, Saulės ir Jupiterio orbitos guli beveik vienoje plokštumoje, todėl besisukantis apie Jupiterį palydovas periodiškai patenka į jo šešėlį ir tampa nematomu. Po 42 h 28 min palydovas vėl pasirodo — staiga sužiba žvaigždutė. Taigi šis palydovas yra tarsi tikslus astronominis laikrodis, vienodais laiko tarpais siunčiantis signalus į Žemę. Riomeris pradėjo stebėjimus tuo metu, kai Žemė, skriedama apie Saulę, buvo labiausiai priartėjusi prie Jupiterio (48.2 pav.). Riomeris nustatė palydovo apsisukimo aplink Jupiterį periodą ir visiems metams į priekį apskaičiavo užtemimų pradžios bei pabaigos laiką. Tačiau palydovas šio kalendoriaus nesilaikė. Žemei tolstant nuo Jupiterio, palydovo užtemimai vis daugiau ir daugiau vėlavo. Tuo metu, kai Žemė buvo tolimiausiame nuo Jupiterio savo orbitos taške, užtemimas vėlavo net 1000 s. Pradėjus Žemei artėti prie Jupiterio, vėlavimai mažėjo, o grįžus į artimiausią tašką palydovo užtemimai vyko tiksliai numatytu laiku.

Riomeris nusprendė, kad vėlavimo priežastis yra šitokia: Žemei nutolus nuo Jupiterio, šviesa užtrunka papildomą laiką pailgėjusiam keliui nueiti. Kadangi, Žemei nutolus per visą savo orbitos skersmenį $d = 3 \cdot 10^{11}$ m, šviesa vėluoja 1000 s, tai



48.2 pav.

Riomerio apskaičiuotas šviesos greitis

$$c=\frac{d}{t}=\frac{3\cdot 10^{11}\ \text{m}}{10^{3}\ \text{s}}=3\cdot 10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Laboratoriniais metodais šviesos greitį nustatė amerikiečių fizikas Albertas Maikelsonas 1925 m. ir gavo tą pačią vertę.

Ar turi greitis ribą?

$3\cdot 10^{8}$ m/s yra šviesos ir visų kitų elektromagnetinių bangų greitis tuštumoje. Tai pats didžiausias greitis Visatoje. *Joks kūnas negali judėti greičiu, didesniu už šviesos greitį tuštumoje.*

Šviesos greitis įvairiose medžiagose nevienodas. Pavyzdžiui, vandenyje jis lygus $2{,}25\cdot 10^{8}$ m/s, stikle — $2\cdot 10^{8}$ m/s, deimante — $1{,}24\cdot 10^{8}$ m/s.

Šviesos greičio tuštumoje santykis su jos greičiu medžiagoje vadinamas tos medžiagos **absoliutiniu lūžio rodikliu** (n):

$$n=\frac{c}{v}. \qquad (48.3)$$

Apie medžiagą, kurios lūžio rodiklis yra didesnis, sakoma, kad ji yra *optiškai tankesnė*. Kai kurių medžiagų lūžio rodikliai nurodyti XVIII lentelėje.

? *1. Ar gali žmogus savo jutimo organais priimti elektromagnetines bangas?*

48.3. Per kiek laiko šviesa iš Saulės ateina į Žemę, jeigu atstumas tarp jų $150\cdot 10^{6}$ km?

48.4. Kokia yra raudonų spindulių fotonų energija, jeigu jų bangos ilgis vakuume 0,72 μm?

48.5. Keli geltonų spindulių (bangos ilgis vakuume 520 nm) fotonai turi 0,001 J energiją?

4.2 skyrius FOTOMETRIJA

49 paskaita

KAIP SEIKĖJAMA ŠVIESA?

§ 49.1. Pagrindiniai šviesos parametrai

Ką matuoti tiriant šviesą?

Norint tirti fizikinį reiškinį, reikia nustatyti jį apibūdinančius dydžius ir išmokti juos matuoti. Pavyzdžiui, tiriant dujas, matuojamas jų tūris, slėgis ir temperatūra. Magnetiniams reiškiniams aprašyti buvo įvestos magnetinio lauko stiprumo, magnetinio srauto ir induktyvumo sąvokos. Kokių gi reikia fizikinių dydžių šviesos reiškiniams aprašyti, įsprausti į griežtus formulių rėmus? Šį klausimą gvildena ir *fotometrija — optikos skyrius, kuriame nagrinėjami šviesos energinių parametrų matavimai.* Čia susipažinsime su trimis svarbiausiais fotometrijos dydžiais: šviesos stiprumu (J), šviesos srautu (Φ) ir apšviestumu (E).

§ 49.2. Šviesos stiprumas

Pradėsime nuo šviesos šaltinius apibūdinančių parametrų.

Saulė — taškinis šviesos šaltinis?

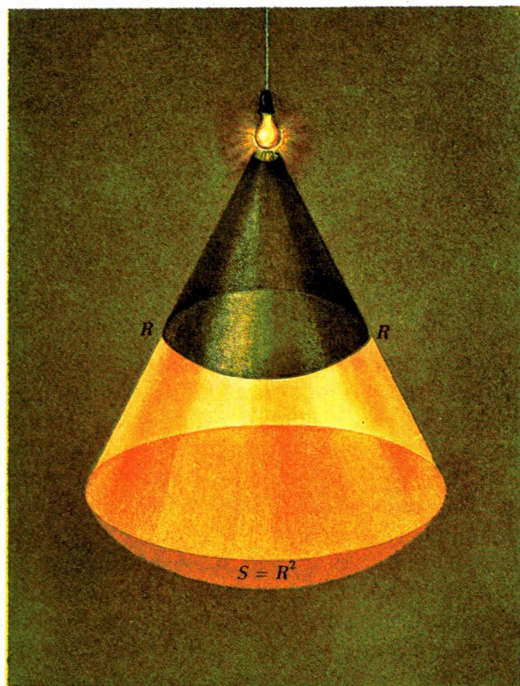
Paprasčiausia nagrinėti vadinamuosius **taškinius** šviesos šaltinius. Šaltinį laikysime taškiniu, jeigu jis spinduliuoja šviesą visomis kryptimis vienodai ir jo matmenys daug kartų mažesni už atstumą iki apšviečiamų kūnų. Taigi taškiniai šaltiniai yra žvaigždės, Saulė, bet gali būti, žiūrint kokiomis aplinkybėmis, ir elektros lemputė.

Praktikoje dažnai būna svarbu, kad

spinduliai sklistų iš šaltinio nesisklaidydami — *lygiagrečiu pluoštu.* Lygiagrečius spindulius skleidžia prožektoriai ir lazeriai. Saulė yra taip toli, kad jos spinduliai Žemėje irgi laikomi lygiagrečiais.

Stereoradianas — steradianas

Norint įvertinti šaltinio spinduliavimą, pirmiausia reikia išmokti apibūdinti, kokio „storumo" sklindantis šviesos srautas. Tuo tikslu vartojama **erdvinio kampo** (Ω) sąvoka. Paprasčiausia erdvinio kampo geometrinė forma yra kūgis. Įsivaizduokime, kad to kūgio viršūnė sutampa su rutulio centru, o tame centre yra taškinis šviesos šaltinis (49.1 pav.). Erdvinio kampo didumas nusakomas rutulio paviršiaus ploto S, kurį išpjauna kūgis, ir rutulio spindulio R kvadrato santykiu:



49.1 pav.

$$\Omega = \frac{S}{R^2}. \qquad (49.1)$$

Šis santykis nepriklauso nuo rutulio spindulio, nes plotas S yra proporcingas spindulio kvadratui.

Erdvinis kampas lygus vienetui, jeigu rutulio paviršiuje jis išpjauna plotą $S = R^2$. Šis erdvinio kampo vienetas vadinamas **steradianu** (sr); taigi

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{R^2}{R^2} = 1 \text{ (sr)}.$$

Visas rutulio paviršiaus plotas $S_{max} = 4\pi r^2$, taigi nesunku apskaičiuoti maksimalų erdvinį kampą, apimantį visą erdvę apie taškinį šviesos šaltinį:

$$\Omega_{max} = \frac{S_{max}}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ (sr)}.$$

Paskutinis pagrindinis SI vienetas

Šaltinių spinduliavimo intensyvumui apibūdinti įvedama **šviesos stiprumo** sąvoka. *Šaltinio šviesos stiprumas* (*J*) *apibūdina spinduliavimo galią vieno steradiano erdviniame kampe.* Šviesos stiprumo vienetas SI yra **kandela** (cd) (lot. *candela* — žvakė). *Kandela — septintasis pagrindinis SI vienetas. Kandelos etalonas — tai specialios konstrukcijos nepaprastai tikslus šviesos šaltinis, tolygiai spinduliuojantis $\frac{1}{683}$ W šviesos energiją 1 sr kampu:*

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{sr}}. \qquad (49.2)$$

Paprastos degančios žvakės šviesos stiprumas yra maždaug viena kandela.

Taigi dabar jau žinome visus septynis pagrindinius SI vienetus: metrą, kilogramą, sekundę, amperą, kelviną, molį ir kandelą.

▲ **49.1.** Centrinis 0,75 sr erdvinis kampas išpjauna iš rutulio paviršiaus 468 cm^2 plotą. Koks to rutulio spindulys?

▲ **49.2.** Centrinis erdvinis kampas išpjauna iš 1,4 m spindulio rutulio paviršiaus 2350 cm^2 plotą. Kokį plotą išpjautų tas pats kampas, jeigu rutulio spindulys būtų 60 cm ilgesnis?

§ 49.3. Šviesos srautas

Šviesos stiprumas rodo, kokią galią šaltinis spinduliuoja vieno steradiano erdviniu kampu. Visų spindulių, sklindančių bet kokiu erdviniu kampu Ω, galią rodo **šviesos srautas.** Vadinasi, *šviesos srautas* (Φ) *yra lygus šviesos stiprumo* (J) *ir erdvinio kampo* (Ω) *sandaugai:*

$$\Phi = J\Omega. \quad (49.3)$$

Šviesos srauto vienetas vadinamas **liumenu** (lm). Iš (49.2) formulės

$$1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr} = 1 \text{ lm}.$$

Jeigu šviesos šaltinio stiprumas J visomis kryptimis vienodas, tai visas skleidžiamas šviesos srautas

$$\Phi_{max} = J \cdot \Omega_{max} = 4\pi J \text{ lm}.$$

Žinant, kad $1 \text{ cd} = \frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{sr}}$, galima liumeną išreikšti vatais:

$$1 \text{ lm} = \frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{sr}} \cdot 1 \text{ sr} = \frac{1}{683} \text{W} = 1{,}46 \times \times 10^{-3} \text{ W}.$$

Viso elektros lempos skleidžiamo šviesos srauto (Φ_{max}) ir jos vartojamos elektros srovės galios (P) santykis vadinamas lempos **šviesos našumu** (k):

$$k = \frac{\Phi_{max}}{P} = \frac{4\pi J}{P} \frac{\text{lm}}{\text{W}}. \quad (49.4)$$

Kaitinamosios elektros lempos tik apie 2% elektros energijos paverčia šviesos energija.

49.3. Kokį šviesos srautą spinduliuoja taškinis 25 cd stiprumo šviesos šaltinis 0,64 sr erdviniu kampu?

49.4. Elektros lempos galia 100 W, o vidutinis šviesos stiprumas 80 cd. Apskaičiuokite jos šviesos našumą.

---

§ 49.4. Apšviestumas

Daiktus matome todėl, kad jie atspindi krintančią į juos šviesą. Atsispindėjusi šviesa patenka į akis ir sukelia regėjimo pojūtį. Daiktą galima įžiūrėti, jeigu jis pakankamai apšviestas. **Apšviestumu** *(E) vadiname šviesos srauto* (Φ) *ir ploto* (S), *į kurį jis krinta, santykį:*

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (49.5)$$

Apšviestumo vienetas — **liuksas** (lx) (lot. *lux* — šviesa). Iš (49.5) formulės:

$$\frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 1 \text{ lx}.$$

Paviršiaus apšviestumas priklauso nuo jo atstumo iki šviesos šaltinio, nuo to šaltinio šviesos stiprumo ir nuo spindulių kritimo kampo (§ 50.1, § 50.2).

49.5. Koks šviesos srautas krinta į stalo paviršių, jeigu jo apšviestumas 9500 lx (kinui filmuoti), o plotas 1,6 m^2?

49.6. Į 0,45 m skersmens apskritą matinį stiklą krinta 120 lm šviesos srautas. Apskaičiuokite stiklo apšviestumą.

---

§ 49.5. Apšviestumo normos

Pristūmę stalinę lempą arčiau skaitomos knygos, geriau matome raides. Tačiau per arti prie lempos skaityti vėl negerai — akys greitai pavargsta, rausta, merkiasi — sakoma, kad „šviesa akina“. Koks gi turi būti normalus, t. y. pakankamas ir akių nevarginantis apšviestumas skaitykloje, siuvimo ceche, tekintojo darbo vietoje, valgykloje, sporto salėje ir kitur, sprendžia medikai, ekonomistai, gamybininkai. Tai opi šiuolaikinė problema, turinti didelę įtaką darbo našumui ir žmonių sveikatai. Todėl nustatomos higieninės apšviestumo normos vi-

soms žmogaus veiklos rūšims. Kai kurios gyvenamųjų ir visuomeninių patalpų apšviestumo normos pateiktos 49.1 lentelėje.

49.1 lentelė. **Apšviestumo normos**

Patalpa	Apšviestumas lx	
	kaitinamosiomis lempomis	dienos šviesos lempomis
Mokymo kabinetas	150	300
Klasės lenta	150	300
Braižybos kabinetas	200	400
Siuvimo kabinetas	200	400
Sporto salė	100	200
Aktų salė	100	200
Skaitykla	150	300
Valgykla, bufetas	75	200
Rūbinė	50	100
Laiptinė ir koridorius	10	30
Šaltkalvystės dirbtuvė	150	300
Mokytojų kambarys	100	200
Gyvenamasis kambarys bendrabutyje	50	100
Virtuvė	30	100
Ligoninės palata	30	75
Operacinė (operacinio stalo paviršius)	3000	—

Pastaba. Patalpos apšviestumas matuojamas 0,8 m nuo grindų.

? *1. Remdamiesi (49.1) lygybe suformuluokite steradiano apibrėžimą.*
2. Remdamiesi (49.3) lygybe suformuluokite liumeno apibrėžimą.
3. Remdamiesi (49.5) lygybe suformuluokite liukso apibrėžimą.
4. Sudarykite šviesos matų lentelę:
1) dydžio pavadinimas,
2) sutartinis žymėjimas,
3) dydį apibrėžianti formulė,
4) matavimo vienetas.

49.7. Taškinis šviesos šaltinis yra 85 cm spindulio skritulio centre ir į to skritulio paviršių, kurio plotas 1,50 m^2, siunčia 360 lm šviesos srautą. Koks to šaltinio šviesos stiprumas ir visas jo spinduliuojamas šviesos srautas?

49.8. Koks yra vidutinis kaitinamosios lempos šviesos stiprumas, jeigu jos galia 120 W, o šviesos našumas 13 lm/W?

Tema referatui: „Olberso fotometrinis paradoksas: „Kodėl naktį tamsu?“

Literatūra: A. Ažusienis, A. Juška, G. Kakaras „Astrofizika“ (X sk.).— K.: „Šviesa“, 1977 m.

50 paskaita

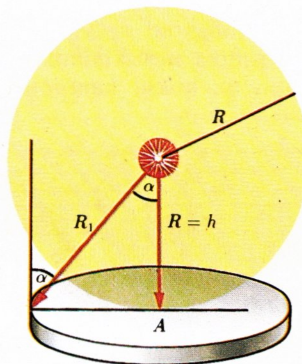
KODĖL BŪNA ŽIEMA IR VASARA

Jau minėjome, nuo ko priklauso daiktų apšviestumas: nuo šviesos stiprumo (J), atstumo iki šviesos šaltinio (R) ir nuo spindulių kritimo kampo (α). Tačiau kaip būtent apšviestumas priklauso nuo šių dydžių?

§ 50.1. Pirmasis apšviestumo dėsnis

Optikai talkina geometrija

Kai šviesos šaltinis taškinis, tai visas jo srautas $\Phi_{max} = 4\pi J$ tolygiai pasiskirsto jį supančios sferos paviršiuje. Jo plotas $S_{max} = 4\pi R^2$ (50.1 pav.), o apšviestumas



50.1 pav.

$$E = \frac{\Phi_{max}}{S_{max}} = \frac{4\pi J}{4\pi R^2} = \frac{J}{R^2}. \quad (50.1)$$

Apšviestumas statmenais spinduliais yra tiesiog proporcingas šaltinio šviesos stiprumui ir atvirkščiai proporcingas atstumo iki šviesos šaltinio kvadratui. Tai pirmasis apšviestumo dėsnis.

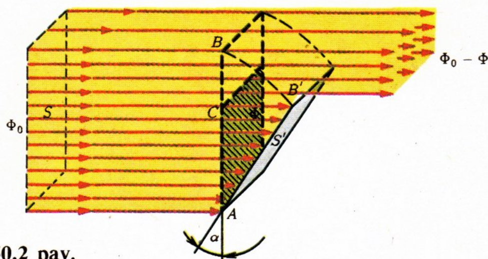
Plokščio paviršiaus, pavyzdžiui, stalo apšviestumą pagal šią formulę galime apskaičiuoti tik viename taške (arba labai mažame plote) — ten, kur spinduliai krinta statmenai stalo paviršiui (50.1 pav., taškas *A*).

50.1. Virš horizontalaus stalo paviršiaus 1,5 m aukštyje kabo 150 cd lempa. Koks stalo paviršiaus apšviestumas po lempa?

50.2. Nedidelis paviršius iš pradžių apšviečiamas 90 cd lempa, o po to 30 cd lempa. Kiek kartų reikia sumažinti atstumą nuo lempos iki paviršiaus, kad liktų toks pat apšviestumas?

§ 50.2. Antrasis apšviestumo dėsnis

Kaip gi priklauso apšviestumas nuo spindulių kritimo kampo? Į šį klausimą lengviau atsakyti tyrinėjant paviršių, apšviečiamą pluoštu lygiagrečių spindulių. Tokiu atveju apšviestumas teoriškai nepriklauso nuo atstumo iki apšviečiamo ploto, nes šviesos srautas nesisklaido. Tačiau jis priklauso nuo to, kokiu kampu spinduliai



50.2 pav.

krinta į apšviečiamą paviršių. Kaip gi apskaičiuoti apšviestumą paviršiaus, ant kurio krinta lygiagretūs šviesos spinduliai?

Kaip matuojamas kritimo kampas

Priminsime, kad *spindulio* **kritimo kampu** *vadinamas kampas tarp krintančio spindulio krypties R_1* (50.1 pav.) *ir statmens apšviečiamam paviršiui*. Kai krinta lygiagretūs spinduliai, patogiau yra matuoti jam lygų[1] kampą tarp apšviečiamos plokštumos S' ir statmenos spinduliams plokštumos S (50.2 pav.).

Optikai talkina trigonometrija

Palyginkime stačiakampės plokštelės apšviestumą, kai ji statmena spinduliams ir kai pasvirusi kampu α (50.2 pav.). Sakykime, plokštelės paviršius lygus S, o ilgis AB. Statmeno paviršiaus apšviestumas $E_0 = \frac{\Phi_0}{S}$. Pakreipus plokštelę kampu α, į ją kris mažesnis šviesos srautas Φ ir paviršiaus apšviestumas bus $E = \frac{\Phi}{S}$.

Apšviestumų santykis lygus:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad \text{arba} \quad E = E_0 \frac{\Phi}{\Phi_0}.$$

50.2 paveiksle matome, kad šviesos srautų santykis Φ/Φ_0 lygus atkarpų $AC : AB = \frac{AC}{AB}$, o pastarasis lygus plokštelės posvyrio kampo kosinusui (žr. statųjį trikampį ACB'). Taigi

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{AC}{AB'} = \cos\alpha. \quad \text{Vadinasi,}$$

$$E = E_0 \cos\alpha. \quad (50.2)$$

Paviršiaus apšviestumas yra tiesiog proporcingas spindulių kritimo kampo kosinusui. Tai antrasis apšviestumo dėsnis.

Pavyzdžiui, spinduliams krintant į paviršių 60° kampu apšviestumas būna perpus mažesnis negu jiems krintant statmenai

[1] Kampai, kurių kraštinės tarpusavyje statmenos.

(cos 60° = 1/2) — tiek kartų sumažėja paviršiui tenkantis šviesos energijos kiekis.

Kodėl keičiasi metų laikai

Žemei sukantis apie Saulę, nuo pavasario ir rudens *lygiadienių* (kovo 21 ir rugsėjo 23 dienomis) iki vasaros ir žiemos *saulėgrįžų* (birželio 22 ir gruodžio 22 dienomis) Saulės spindulių kritimo į Žemę kampas pasikeičia — sumažėja ar padidėja — tik 23°27′. O kokį tai sukelia šviesos ir šilumos pasikeitimą!

Universali apšviestumo formulė

Praktikoje dažnai tenka skaičiuoti apšviestumą tokiomis aplinkybėmis, kai krinta ne statmenai į paviršių taškinio šviesos šaltinio spinduliai (pvz., apšviestumas 50.1 pav. taške *B*). Tokiu atveju reikia atsižvelgti ir į atstumą iki šaltinio R_1, ir į spindulių kritimo kampą α. Į II dėsnio formulę (50.2) įrašykime E_0 išraišką iš I dėsnio ir gausime **jungtinę apšviestumo formulę**

$$E = \frac{J}{R_1^2}\cos\alpha. \qquad (50.3)$$

Šioje formulėje galime pakeisti $\cos\alpha = h/R_1$ (50.1 pav.); tada

$$E = \frac{Jh}{R_1^3} \qquad (50.4)$$

Jeigu paviršių apšviečia keletas šaltinių, tai bendras apšviestumas lygus atskirų šaltinių sudaromų toje vietoje apšviestumų sumai.

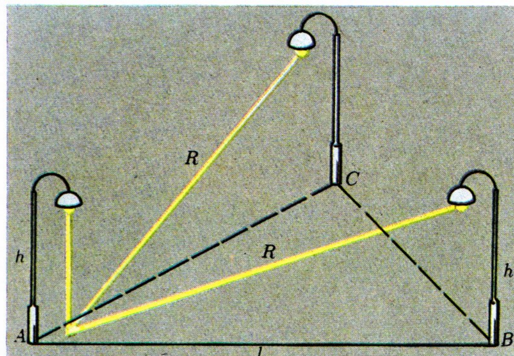
Pavyzdys. Kiemą apšviečia trys 200 cd lempos, kabančios 3,0 m aukštyje. Atstumas tarp bet kurių dviejų lempų 2,5 m. Koks kiemo apšviestumas po kiekviena lempa?

S p r e n d i m a s. Iliustruojame sąlygą brėžiniu (50.3 pav.).

1. Apšviestumas po kiekviena lempa susideda iš apšviestumų visų trijų lempų spinduliais:

$$E = E_A + E_B + E_C .$$

Lempos *B* ir *C* apšviečia tašką *A* vienodai, todėl



50.3 pav.

$E = E_A + 2E_B$ (pagrindinė šio uždavinio lygtis).

2. Lempa *A* apšviečia tašką *A* statmenais spinduliais, todėl $E_A = J/h^2$.

Apšviestumui lempos *B* spinduliais rasti taikome universalią formulę (50.4): $E_B = Jh/R^3$. Sprendimui reikalingą atstumą *R* rasime pritaikę Pitagoro teoremą: $R = \sqrt{h^2 + l^2}$.

Įrašome E_A ir E_B išraiškas į pagrindinę lygtį:

$$E = \frac{J}{h^2} + \frac{2Jh}{(\sqrt{h^2 + l^2})^3}.$$

3. Salygoje randame reikiamus duomenis:
$J = 200$ cd,
$h = 3$ m,
$l = 2{,}5$ m.

4. Įrašome duomenis į gautąją lygtį ir apskaičiuojame:

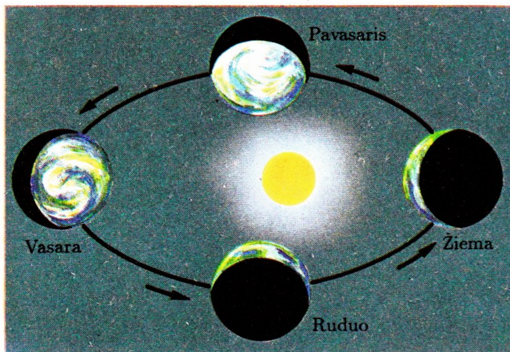
$$E = \frac{200}{3^2}\,\text{lx} + \frac{2\cdot 200\cdot 3}{(\sqrt{3^2 + 2{,}5^2})^3}\,\text{lx} = 42\ \text{lx}.$$

Ats.: $E = 42$ lx.

50.3. Ties stalo viduriu 1,5 m aukštyje kabo 120 cd lempa. Koks yra didžiausias ir mažiausias stalo apšviestumas, jeigu jo ilgis 1,5 m, o plotis 1,0 m?

Šviesos matuokliai

Apšviestumas matuojamas specialiu prietaisu, vadinamu **liuksmetru.** Jautrioji jo dalis yra *fotoelementas* — puslaidininkinis prietai-



50.4 pav.

sas, šviesos energiją paverčiantis elektros energija. Elektros srovė nukreipia galvanometro rodyklę proporcingai fotoelemento apšviestumui.

Tokiu pačiu principu veikia ir **fotoeksponometras** — prietaisas ekspozicijos trukmei nustatyti fotografijoje priklausomai nuo fotografuojamo objekto apšviestumo.

? *1. Altajiečių pasaka: „Susiginčijo kupranugaris su pele, kuris jų pirmiau pamatys tekančios saulės šviesą. Kupranugaris ėmė žiūrėti į rytus, o pelė užsiropštė kupranugariui ant nugaros ir ėmė žiūrėti į vakarus, kur dunksojo kalnai“. Kuris laimėjo ginčą ir kodėl?*
2. Įrodykite, kad 50.1 paveiksle pažymėti kampai α yra lygūs.
3. Žemės orbitos forma — elipsė, kurios viename židinyje yra Saulė (50.4 pav.). Arčiausiai Saulės Žemė būna sausio mėnesio pradžioje. Kodėl Lietuvoje tai pats šalčiausias mėnuo?
4. Remdamiesi (50.3) lygybe, suformuluokite jungtinį apšviestumo dėsnį.
5. Kodėl, tirpstant sniegui ant stogo, pastogėje susidaro ledo varvekliai?

50.4. 300 cd lempa kabo ant stulpo 3,0 m aukštyje nuo žemės. Kokį apšviestumą ji sudaro žemės paviršiaus taške, nutolusiame 4,0 m nuo tiesiog po lempa esančio taško?
50.5. Ant stulpo pakabintos viena virš kitos dvi 250 cd lempos, nutolusios nuo žemės paviršiaus 2,5 ir 3,5 m. Koks yra žemės paviršiaus apšviestumas 2,5 m atstumu nuo to taško, virš kurio kabo lempos?

Tema referatui: „Apšviestumo problemos mano būsimame darbe“.

4.3 skyrius
BANGINĖ OPTIKA

51 paskaita
UODO SPARNO OPTIKA

„Kas pagalvotų, kad šviesa, susidurdama su šviesa, gali sukurti tamsą!...“

Prancūzų fizikas Dominikas Arago (1786—1853)

§ 51.1. Šviesos interferencija

Nokautas korpuskulinei teorijai

XVIII amžiuje optikoje buvo tvirtai įsigalėjusi Niutono korpuskulinė šviesos teorija, nes ji paaiškino visus tuomet žinotus optinius reiškinius. 1802 m. jaunas anglų mokslininkas, iš profesijos gydytojas, Tomas Jungas atliko bandymą, kurio rezultatai sukėlė sąmyšį fizikų tarpe.

Jungas apšvietė vienspalve šviesa dvi labai mažas adata pradurtas arti viena kitos skylutes ir stebėjo ekrane pro jas praėjusią šviesą. Du šviesos skrituliai iš dalies užėjo vienas ant kito, ir ten vietoj stipresnio tolygaus apšvietimo, ko galima buvo tikėtis, Jungas pamatė seriją tamsių ir šviesių linijų (51.1 pav.). Vieną angą uždengus linijos išnykdavo. Taigi, *susidūrus dviem šviesos pluoštams, vienose vietose šviesa šviesą stiprino, kitose — silpnino.* Šio reiškinio

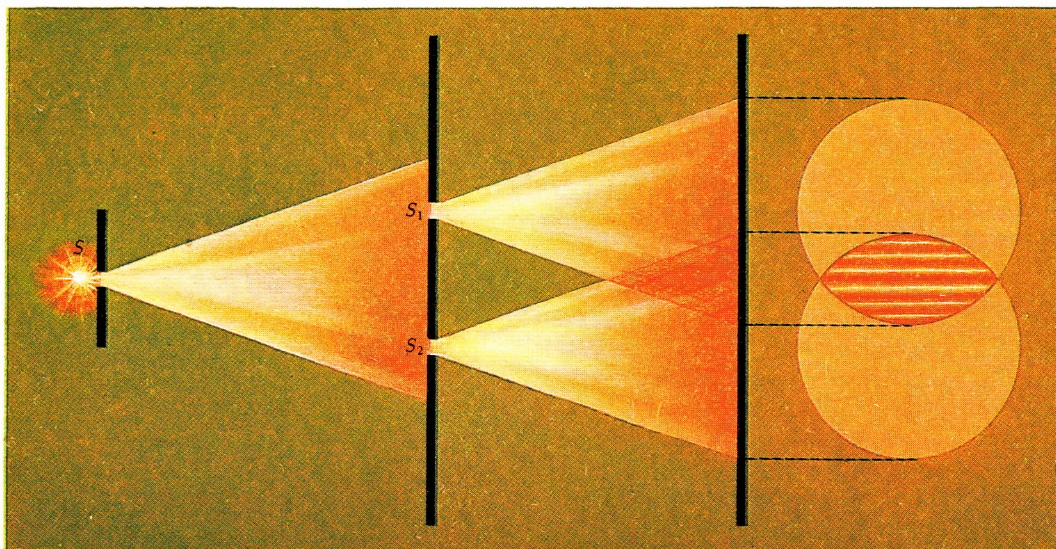
nebuvo įmanoma paaiškinti remiantis korpuskuline šviesos teorija. Šviesa aiškiai elgėsi kaip susidūrusios iš dviejų vietų sklindančios bangos vandens paviršiuje. Bangoms vandens paviršiuje ir garso bangoms ore šis reiškinys tuo metu jau buvo žinomas ir ištirtas.

Remdamasis analogija su mechaninėmis bangomis, Jungas paprastai paaiškino eksperimento rezultatus: „Aš galvoju,— rašė Jungas,— kad tokie pat procesai vyksta ir tada, kai susimaišo du pluoštai šviesos. Šį reiškinį aš pavadinu „bendru interferencijos dėsniu“. Taigi, Jungas sugalvojo terminą bangų sudėčiai apibūdinti — **interferencija** (lot. *inter* — tarp + *ferentis* — nešantis).

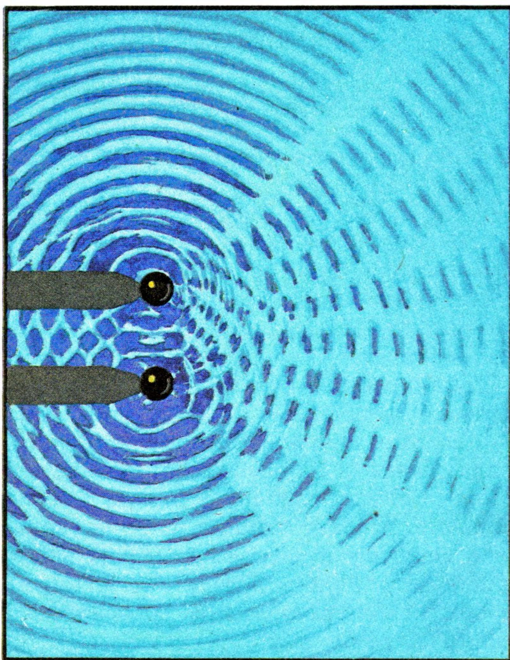
Interferencinio vaizdo susidarymas

Įsivaizduokime, kad dviejose bangose, atėjusiose į tiriamąjį tašką iš vienodų šaltinių, svyravimų fazės sutampa. Tuomet atstojamojo svyravimo amplitudė bus dvigubai didesnė — bangos sustiprins viena kitą. Dabar įsivaizduokime kitą tašką, kurį bangos pasiekia „paslinkusios“ per pusę bangos ilgio. Ten svyravimai, būdami priešingų fazių, užgesins vienas kitą, bangavimas išnyks. Vadinasi, atstojamosios bangos amplitudė įvairiose vietose bus nevienoda: *maksimumą* gausime ten, kur dvi bangos susitiks vienodomis fazėmis, *minimumą* — kur jos susitiks priešingomis fazėmis. Tarpiniuose taškuose, kur fazių skirtumas kitoks, atstojamosios bangos amplitudė kinta nuo maksimalios iki nulio.

Šitaip interferuoja mechaninės bangos vandens paviršiuje — susidaro pakaitomis išsidėsčiusios lygaus ir banguojančio paviršiaus juostos (51.2 pav.). Taip pat interferuoja ir elektromagnetinės bangos: maksimumuose susidaro kintantis dviguba amplitude elektrinis ir magnetinis laukas, minimumuose jo nelieka. Todėl, interferuojant šviesai, ir matomi šviesūs bei tamsūs ruoželiai (51.1 pav.).



51.1 pav.



51.2 pav.

Tačiau pastovus interferencinis vaizdas susidaro tik tada, kai bangos yra tiksliai suderintos. Pirma, turi būti vienodas abiejų bangų ilgis, kitaip sakant, vienodas dažnis. Antra, jų fazių skirtumas turi būti pastovus: ten, kur fazės sutampa, jos turi visą laiką sutapti, kur priešingos — turi likti priešingos ir t. t. Šias dvi sąlygas atitinkančios bangos vadinamos **koherentinėmis.**

Vandens paviršiuje koherentines bangas ir jų interferenciją (51.2 pav.) galima stebėti lašinant vandenį iš dviejų vienodų lašintuvų.

Optikoje koherentines bangas įmanoma gauti tik iš to paties šviesos šaltinio. Veidrodžiais arba prizmėmis šviesos pluoštas išskiriamas į du pluoštus, kurie, nuėję nevienodą kelią, krinta į tą patį paviršių. Tik pastaraisiais dešimtmečiais buvo sukurti atskiri koherentinės šviesos šaltiniai — garsieji lazeriai, apie kuriuos kalbėsime § 59.2.

Interferencinio vaizdo geometrija

Dviejų šaltinių skleidžiamos bangos vienose vietose susitiks vienodų ženklų nuokrypomis nuo pusiausvyros padėties, kitose — priešingų. Vienodų ženklų ir dydžio nuokrypos sumuojasi, ir tose vietose susidaro **maksimumai** — dvigubi iškilimai arba įdubimai vandens paviršiuje arba šviesios linijos ekrane.

Susitikę vienodo dydžio ir priešingų ženklų bangos viena kitą kompensuoja, ir toje vietoje lieka lygus vandens paviršius arba tamsi dėmė ekrane — **minimumas.** Minimumai ir maksimumai išsidėsto spinduliais ir juostomis visame banguojančiame plote ir sudaro interferencinį vaizdą.

Minimumų ir maksimumų paieškos

Norint išsiaiškinti, kur susidarys interferenciniai maksimumai ir minimumai, reikia nagrinėti abiejų interferuojančių bangų kelius l_1 ir l_2 nuo bendro šaltinio iki susitikimo taško. Skirtumą

$$d = l_1 - l_2 \qquad (51.1)$$

vadiname *geometrinių kelių skirtumu.*

Jeigu atstume d telpa sveikasis skaičius bangos ilgių ($d = \lambda$; 2λ ir t. t.), tai bangos susitinka vienodomis fazėmis — tuose taškuose susidaro interferenciniai maksimumai. Jeigu, dėstant kelių skirtume bangos ilgius, lieka pusė bangos ($d = 1{,}5\ \lambda$; $2{,}5\ \lambda$ ir t. t.), tai bangos susitinka priešingomis fazėmis — tuose taškuose susidaro minimumai.

Šviesos interferencijos ypatumai

Tačiau šviesos bangų ilgis priklauso ir nuo aplinkos, kuria ji sklinda, nes sklidimo greitis priklauso nuo aplinkos lūžio rodiklio. Kaip žinome, $v = \frac{c}{n}$ (48.3), taigi bangos ilgis

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{n}; \qquad (51.2)$$

čia λ — bangos ilgis vakuume.

Todėl tuo atveju, kai šviesa sklinda ne vakuumu, interferenciją lemia ne geometrinių kelių skirtumas, o vadinamasis **optinių kelių skirtumas** (δ). Jeigu spinduliai sklinda skirtingomis aplinkomis, kurių lūžio rodikliai n_1 ir n_2, tai

$$\delta = n_1 l_1 - n_2 l_2. \qquad (51.3)$$

Šviesos interferenciniai maksimumai, t. y. šviesios juostos susidaro visuose taškuose, kur spindulių optinių kelių skirtumas lygus sveikajam bangos ilgių skaičiui:

$$\delta = k\lambda; \qquad (51.4)$$

čia k — bet koks sveikasis skaičius.

Interferenciniai minimumai, t. y. tamsios juostos, susidaro tuose taškuose, kur optinių kelių skirtumas sudaro nelyginį pusbangių skaičių:

$$\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}. \qquad (51.5)$$

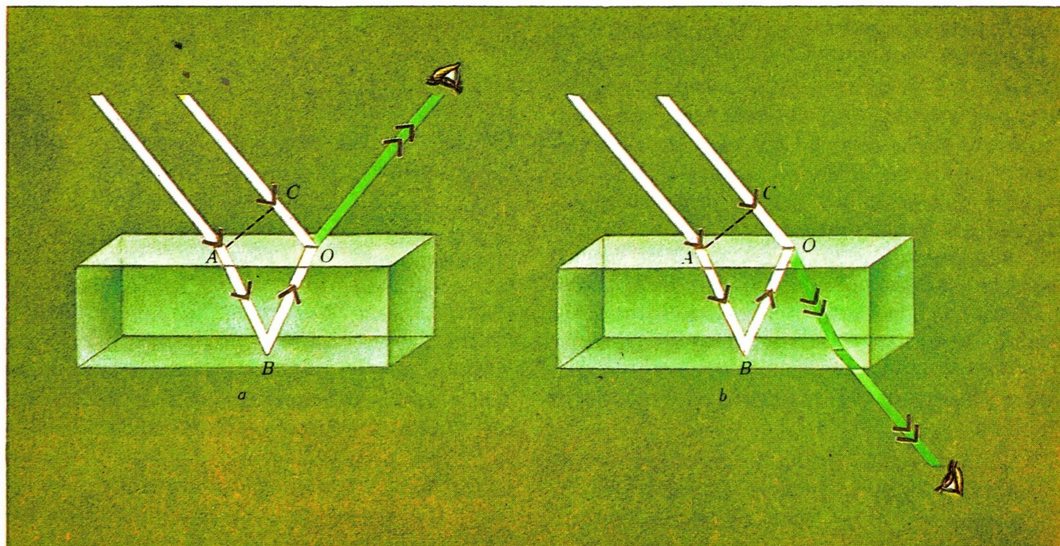
51.1. Į vieną erdvės tašką ateina koherentiniai spindulių pluoštai, kurių optinių kelių skirtumas lygus 2,0 μm. Sustiprės ar susilpnės tame taške šviesa, kurios bangos ilgis 760 nm; 600 nm; 400 nm?

51.2. Į vieną erdvės tašką ateina koherentiniai spinduliai, kurių bangos ilgis ore 600 nm, o optinių kelių skirtumas 1,2 μm. Ką matysime toje vietoje spinduliams interferuojant ore, vandenyje, stikle, kurio lūžio rodiklis 1,5?

§ 51.2. Skaidrių plėvelių spalvos

Spalvinimas be dažų

Šviesos interferencijos atradimas svarbus ne vien tuo, kad įrodė banginę šviesos prigimtį. Interferencija paaiškino ir kitus nesuprantamus optinius reiškinius. Viena tokių gamtos mįslių — raibuliuojantys visomis vaivorykštės spalvomis labai ploni skaidrūs bet kokių medžiagų sluoksniai: laumžirgio



51.3 pav.

sparnai, muilo burbulai, riebalų ar naftos produktų dėmės vandens paviršiuje, paukščių plunksnos, plonas šilkas, perlamutras ir kt. Atradus šviesos interferenciją, panašius vaivorykštinius raštus galima sukurti dirbtinai ir be plėvelių — tam reikia dviejų koherentinių šviesos šaltinių ir gana sudėtingos optinės sistemos. Kaip „nusidažo" plėvelės, paaiškino jau Jungas, remdamasis šviesos interferencijos principais.

Kaip atsiranda spalvos?

Pasiekę plėvelės išorinį paviršių, šviesos spinduliai iš dalies atsispindi, o iš dalies lūžę įsiskverbia į vidų. Tas pat įvyksta ir spinduliams pasiekus apatinį plėvelės paviršių (51.3 pav., *a* ir *b*). Todėl nuo kiekvieno paviršiaus taško, pavyzdžiui, taško *O*, į akį ateina du spinduliai, kurių nueiti keliai *ABO* ir *CO* skiriasi, taigi skiriasi ir optiniai keliai. Jeigu šis skirtumas yra lygus kokios nors spalvos šviesos bangų nelyginiam pusbangių skaičiui, tai tos bangos susitinka priešingomis fazėmis ir interferuodamos viena kitą panaikina. Kitokiems, t. y. kito bangos ilgio, spinduliams šis eigos skirtumas atitiks, atvirkščiai, interferencinio maksimumo sąlygą — tos spalvos šviesa sustiprės. Todėl atspindėtoje šviesoje (51.3 pav., *a*) arba praėjusioje šviesoje (51.3 pav., *b*) kiekviename taške matome jau ne baltą, o atitinkamos spalvos šviesą, kuriai susidaro interferencinis maksimumas.

Kituose taškuose jau kitų spalvų šviesos bangos susitiks vienodomis fazėmis ir sudarys interferencinius maksimumus, taigi tie taškai žėrės vis kitomis spalvomis.

Plėvelę apšvietus vienos spalvos spinduliais, matomos tik tos spalvos ir tamsios juostos.

Muilo burbulo optika

Jeigu plėvelės storis laikui bėgant kinta, tai kinta sudarančių interferencinius maksimumus šviesos spindulių bangos ilgis, todėl plėvelės spalva stebint mainosi. Pavyzdžiui, muilo burbului vartaliojantis, vanduo teka į apatinę dalį, keičiasi sienelės storis ir burbulo spalvos.

§ 51.3. Šviesos interferencijos pritaikymas

Kaip išmatuoti plauko storį?

Interferencija vyksta ir tada, kai šviesa atsispindi nuo dviejų paviršių, tarp kurių yra plonas oro sluoksnis. Apšvieskime vienspalviais statmenais spinduliais dvi suglaustas stiklines plokšteles, tarp kurių viename krašte įsprausta adata arba dar mažesnio storio atramėlė (51.4 pav.). Pamatysime, kad dėl pleišto formos oro tarpo susidarys interferencinės juostos, lygiagrečios plokštelių lietimosi briaunai. Tamsios ir šviesios linijos šiuo atveju išsidėstys vienodais atstumais.

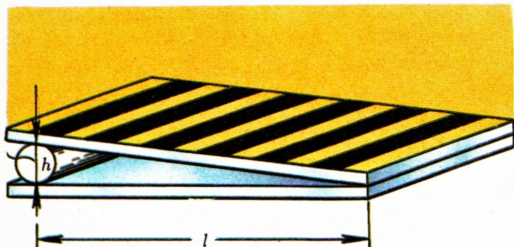
Išmatavus atstumą tarp juostų *a*, galima apskaičiuoti adatos, plauko arba kito įsprausto daikto storį *h*:

$$h = \frac{\lambda l}{2na}; \qquad (51.6)$$

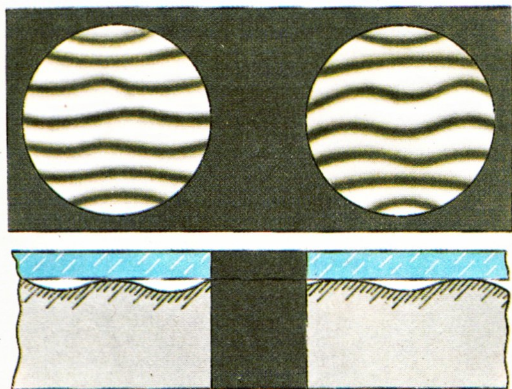
čia l — pleišto pagrindo ilgis, n — stiklo lūžio rodiklis, o λ — šviesos bangos ilgis.

Fantastiško tikslumo matavimai

Kai oro tarpelis tarp stiklo paviršių yra nevienodo storio, susidaro ne lygiagrečios, o išsikraipiusios interferencinės linijos. Todėl, uždėjus ant tiriamojo paviršiaus itin lygią stiklo plokštelę, pagal interferencines linijas (51.5 pav.) galima išmatuoti to paviršiaus nelygumus. Pritaikius interferencijos reiškinį sukurti nepaprasto tikslumo optiniai matavimo prietaisai **interferometrai.** Paviršiaus nelygumai interferometrais išmatuojami net $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ m tikslumu, o kampai — 10^{-6} rad tikslumu. Interferenciniais



51.4 pav.



51.5 pav.

metodais tikrinama paviršių šlifavimo kokybė, matuojami ilgėjimo koeficientai, itin plonų gijų storiai ir kt.

51.3. Matuojant plauko storį, jis buvo uždėtas ant stiklinės plokštelės ir iš viršaus uždengtas kita plokštele. Atstumas nuo plauko iki jam lygiagrečios plokštelių lietimosi linijos lygus 20 cm. Apšvietus plokšteles raudona šviesa ($\lambda = 750$ nm), 1,0 cm tarpe susidaro 8 juostos. Apskaičiuokite plauko storį.

51.4. Labai mažo kampo α pleištas iš stiklo, kurio lūžio rodiklis 1,5, apšviečiamas statmenais jo paviršiui monochromatinės šviesos spinduliais. Ant jo matomos pakaitomis einančios tamsios ir šviesios juostos. Koks yra pleišto kampas α, jeigu atstumas tarp gretimų tamsių juostų lygus 12 mm, kai šviesos bangos ilgis $\lambda = 650$ nm?

---

§ 51.4. Holografija

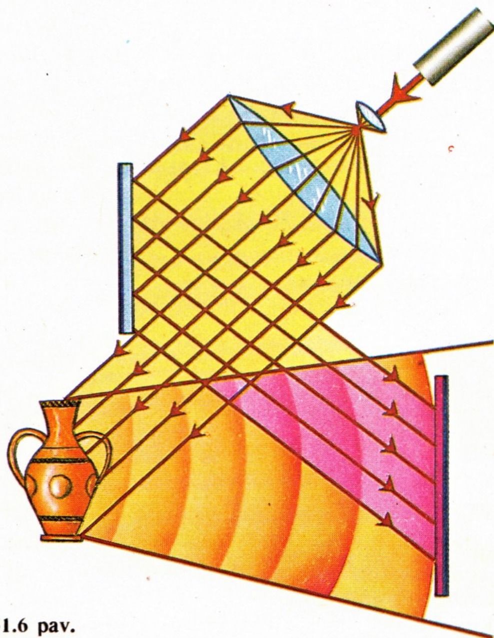
Nuostabus amforos atvaizdas

Vilniaus universiteto lazerinės fizikos laboratorijoje stovi plokštelė su natūralaus dydžio antikinės amforos atvaizdu. Nuostabą kelia ne tiek puošnus paauksuotas senovinis indas, kiek tai, kad atvaizdas — ne plokščias, o erdvinis! Maža to, jį galima apeiti ir apžiūrėti iš visų šonų: keisdami stebėjimo kampą, jaučiamės tarsi apeitume pačią amforą — ją matome vis kitu kampu; atsiranda naujos detalės, vienos dalys užstoja kitas.

Čia susiduriame su dar vienu šviesos interferencijos pritaikymu — **holografija** (gr. *holos* — visas + *graphō* — rašau).

Lazeris vietoj fotoaparato

Fotografuojant įprastiniu būdu, fotojuostoje užfiksuojamos atsispindėjusių nuo įvairių



51.6 pav.

daikto taškų šviesos bangų amplitudės. Kur amplitudė didesnė, ten šviesesnę dėmelę matome atvaizde. Daugiau informacijos amplitudė perduoti negali. Lieka nepanaudotas dar vienas informacijos apie daiktą šaltinis — atsispindėjusių šviesos bangų fazė. O ją galima užfiksuoti interferenciniame vaizde.

Daikto erdvinio atvaizdo užrašymo ir atgaminimo metodas, pagrįstas šviesos interferencija, vadinamas **holografija,** o šiuo metodu gautas atvaizdas vadinamas **holograma.**

Holografavimo aparato schema parodyta 51.6 paveiksle. Lazerio spindulys (*1*) specialiais lęšiais (*2*) ir veidrodžiu (*3*) padalijamas į dvi dalis. Viena dalis — *pagalbinis spindulys* — nuo veidrodžio nukreipiama tiesiai į fotoplokštelę (*4*), o kita dalis — *pagrindinis spindulys* — patenka į plokštelę atsispindėjusi nuo objekto (*5*). Susitikusios šviesos bangos sudaro interferencinį atvaizdą, kurį ir fiksuoja fotoplokštelė. Ją išryškinus ir užfiksavus gaunama holograma.

Norint atgaminti užfiksuotą hologramoje atvaizdą, būtina ją apšviesti tokiu pat, kokiu buvo holografuota, lazerio spinduliu. Jam krintant tuo pačiu kampu, kaip pagalbinis spindulys holografuojant, ir žiūrint pagrindinio spindulio kryptimi, į akį ateis iš hologramos tokie spinduliai, kokius skleidė holografuojamas objektas, todėl ir bus matomas natūralus tūrinis daikto atvaizdas.

Neliūdėk sudužus hologramai!

Holografuojant kiekvieną fotoplokštelės paviršiaus tašką pasiekia šviesa, atsispindėjusi nuo visų objekto paviršiaus taškų. Taigi kiekviename hologramos lopinėlyje yra informacija apie visą holografuotą objektą. Neįtikėtina, bet faktas — uždengus hologramos dalį, vis tiek matomas viso objekto atvaizdas! Tiesa, ne toks ryškus, bet visas.

Holografijos perspektyvos

Holografiją išrado 1948 m. Dėnešas G a b o r a s (D. Britanija), bet sparčiai imta tobulinti ir naudoti tik paskutinį dešimtmetį, kai ištobulėjo ir tapo lengviau prieinama lazerinė technika.

Holografijos būdu gaminamos muziejinių eksponatų reprodukcijos, matuojamos labai mažos kūnų deformacijos, nustatomi smulkiausi defektai. Holografija naudosis ateities kinas ir televizija. Tai vienas didžiausių mūsų amžiaus išradimų.

?

1. Sugalvokite šviesos interferencijos apibrėžimą.
2. Kodėl, žiūrint į tą pačią muilo burbulo vietą, jos interferencinė spalva nuolat keičiasi?
3. Pakreipus galvą į šoną, keičiasi plonos plėvelės spalvos. Kodėl?
4. Skaidraus ledo arba stiklo įskilimai žėri visomis vaivorykštės spalvomis. Kodėl?
5. Išvardykite svarbiausias hologramos ypatybes.

51.5. Tarp dviejų stiklinių plokštelių suspausta plona metalinė vieliukė, kurios skersmuo 0,085 mm. Atstumas nuo vieliukės iki linijos, kurioje susiliečia plokštelės, sudarydamos oro pleištą, lygus 25 cm. Apšvietus plokšteles monochromatiniais spinduliais, kurių $\lambda = 700$ nm, matomos interferencinės juostos, lygiagrečios plokštelių lietimosi linijai. Kelios linijos telpa 1,0 cm tarpe?

51.6. Į plokštelę, kurios medžiagos lūžio rodiklis 1,54, krinta statmenai paviršiui bangos ilgio $\lambda = 760$ nm spinduliai. Kokio mažiausio storio turi būti ta plokštelė, kad atsispindėjusioje šviesoje ji atrodytų raudona, juoda?

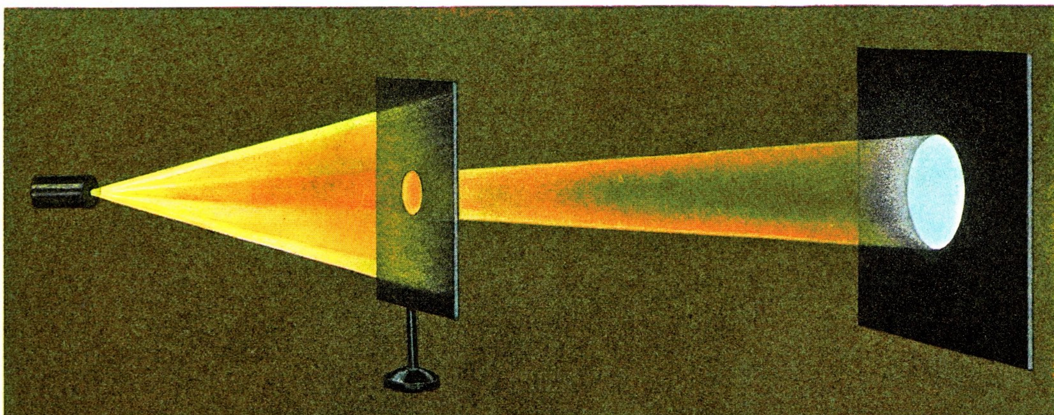
52 paskaita

SPALVŲ MUZIKOS ABĖCĖLĖ

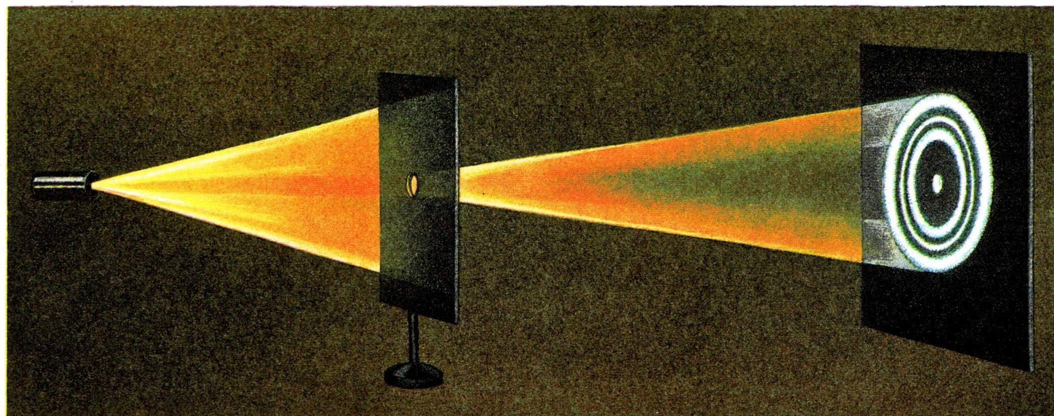
§ 52.1. Šviesos difrakcija

Kur baigiasi geometrinė optika?

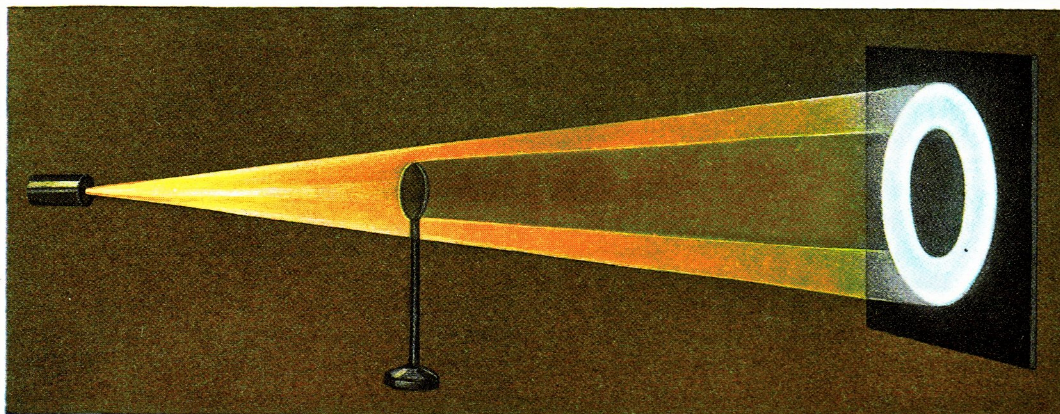
Tai, kad šviesa sklinda tiesiai, atrodo savaime suprantama ir neabejotina. Šį dėsnį įtikinamai patvirtina šešėlio susidarymas už neskaidrių kliūčių. Tačiau, tobulėjant fizikos eksperimentams, buvo atskleistos naujos spindulių savybės: pasirodo, sutikę labai mažas kliūtis, jie tampa visiškai nepavaldūs geometrinės optikos dėsniams. „Labai mažomis“ optikoje vadinamos kliūtys, kurių matmenys yra maždaug tos pačios eilės kaip šviesos bangos ilgis. Pavyzdžiui, praeinant šviesai pro apvalią angą, ekrane matome šviesų skrituliuką (52.1 pav., *a*). Mažinant angą skrituliukas mažėja. Tačiau, kai angos skersmuo sumažėja maždaug iki 0,1 mm, šviesi dėmė išplinta ir vientisas skrituliukas virsta pakaitomis išsidėsčiusiais šviesiais ir tamsiais žiedais (52.1 pav., *b*).



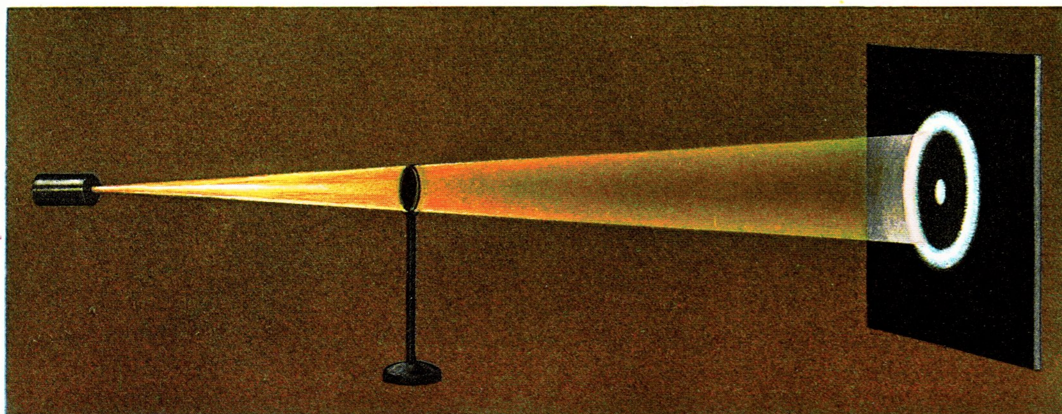
a



b



c



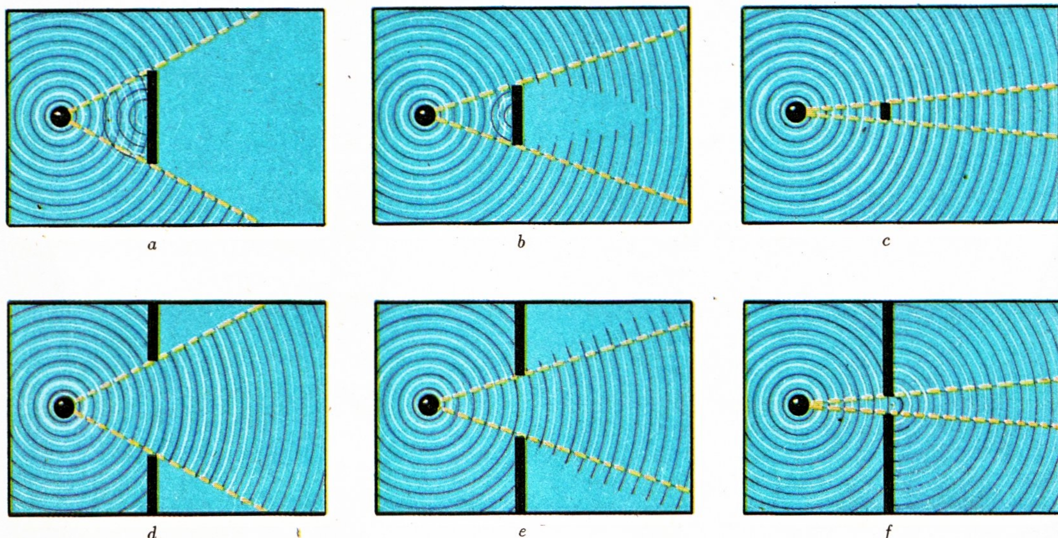
52.1 pav. *d*

Panašus reiškinys vyksta ir kai užstoja šviesai kelią apvali kliūtis. Spindulių pluošto kelyje padėję monetą, ekrane matysime taisyklingą jos šešėlį (52.1 pav., *c*), o padėję toje pačioje vietoje degtuko galvutės dydžio diskelį, ekrane gausime tamsių ir šviesių žiedų raštą (52.1 pav., *d*). Nuostabiausia matyti šešėlio centre šviesų tašką!

Aprašytuose bandymuose *šviesa sklinda ne tiesiai, bet užlinksta už kliūties.* Šis reiškinys vadinamas **šviesos difrakcija** (lot. *diffractus* — sulaužytas).

Mechaniniai šviesos sklidimo modeliai

Jau seniai buvo žinoma, kad panašūs reiškiniai vyksta sklindant garso bangoms ore ir bangoms vandens paviršiuje. Jie buvo ir gerai ištirti. 52.2 paveiksle, *a, b, c,* matome, kaip bangos vandens paviršiuje, sutikusios kliūtį, vis labiau užlinksta į šešėlio pusę tai kliūčiai mažėjant. Nuo tam tikro kliūties pločio bangos visiškai ją apgaubia, už kliūties susiglaudžia ir plinta tolyn taip, tarsi kliūties nė nebūtų.



52.2 pav.

Difrakciją galima stebėti ir bangoms praeinant pro angą kliūtyje (52.2 pav., *d, e, f*). Jeigu anga kliūtyje yra žymiai didesnė už bangos ilgį, tai bangos pro ją sklinda tiesiai (52.2 pav., *d*). Angai mažėjant bangos vis labiau užlinksta į šešėlio pusę, vis platėja prasiskverbusių bangų pluoštas, kol pagaliau nuo plyšio, kaip nuo šaltinio, pradeda sklisti žiedinės bangos (52.2 pav., *f*).

Taigi šviesos difrakcija dar kartą patvirtino banginę šviesos prigimtį.

Interferencijos vaidmuo difrakcijoje

Difrakcijos reiškinys neatskiriamai susijęs su interferencija.

Difrakcijos atveju interferuoja ne dviejų šaltinių bangos, o tos pačios bangos atskiros dalys. Kaip gi tai suprasti? Kiekvienas aplinkos taškas, kurį pasiekia ir sutrikdo atsklidusi banga, tampa žiedinių bangų šaltiniu. Tą aiškiausiai rodo 52.2 paveikslas, *f*. Štai tos bangos, sklindančios iš visų aplinkos taškų, kuriuos pasiekė sklindanti banga, ir užsikloja vienos ant kitų, interferuoja. Šios interferencijos rezultatas — toliau sklindanti atstojamoji banga.

Difrakcija optiniuose prietaisuose

Dėl šviesos difrakcijos pro mikroskopą stebimų labai smulkių daiktų atvaizdai tampa neryškūs, išplinta, detalės susilieja. Todėl optiniai mikroskopai negali didinti daugiau kaip 1000 kartų.

Difrakcija apriboja ir teleskopų galimybę atskirti gretimus objektus. Dėl difrakcijos prie teleskopo vamzdžio angos kraštų žvaigždžių atvaizdus apsupa šviesūs žiedai. Kai žvaigždės labai artimos, tie žiedai užkloja vieni kitus ir akys negali atskirti, ar šviečia vienas taškas, ar keli. Norint sumažinti šį efektą, tenka didinti teleskopo angą. Vieno didžiausių pasaulyje 6 m skersmens teleskopo, pastatyto Šiaurės Kaukaze netoli Zelenčiuko gyvenvietės, skiriamoji geba — $0'',02$. O plika akimi galima atskirti dvi žvaigždes, esančias ne arčiau $1'$—$2'$ viena nuo kitos.

§ 52.2. Difrakcinė gardelė

Difrakcijos reiškiniai ne vien žalingi, jie plačiai taikomi moksle ir praktikoje. Pavyzdžiui, tiriant Rentgeno spindulių difrakciją kristaluose, buvo išaiškinta kristalų struktūra, atomų išsidėstymas gardelėse. Difrakciniais metodais tiriama šviesos sudėtis ir matuojami jos bangų ilgiai. Šiam tikslui naudojami optiniai prietaisai, vadinami **difrakcinėmis gardelėmis.**

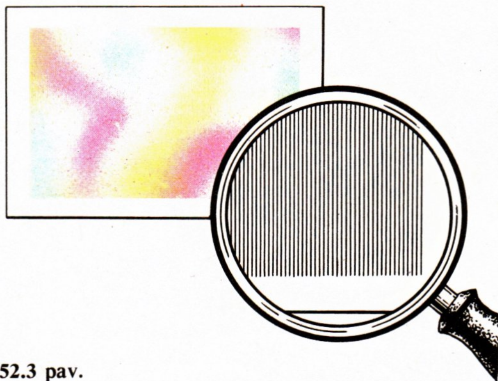
Preciziškas stiklo raižymas

Gaminant difrakcines gardeles, stiklo paviršiuje labai plonu deimantiniu rėžikliu įrėžiami lygiagretūs rėžiai. Rėžiai tampa neskaidrūs, o tarpai lieka skaidrūs ir atlieka plyšelių vaidmenį. Aukštos kokybės gardelėse kiekviename milimetre įrėžiama po tūkstantį ir daugiau rėžių (52.3 pav.). Vieno skaidraus plyšio ir rėžio bendras plotis vadinamas **gardelės konstanta** (d).

Kaip susidaro difrakcinis spektras

Praeidama pro gardelės plyšius šviesa difrahuoja ir už kiekvieno plyšio plinta visomis kryptimis. Taigi kiekvienas plyšys tampa koherentinių bangų šaltiniu, ir ekrane matomas stabilus tų bangų interferencijos vaizdas. Apšvietę gardelę lygiagrečiais vienspalviais spinduliais, ekrane matysime ryškias siauras tos spalvos linijas. Kiekvienos spalvos linijos, žiūrint koks bangos ilgis, bus vis kitoje vietoje (52.4 pav., *a, b*). Todėl, gardelę apšvietę balta šviesa, matysime iš karto visų vaivorykštės spalvų linijas — **difrakcinį spektrą** (52.4 pav., *c*). Jis sudarytas iš septynių pagrindinių spalvų (žr. 52.1 lent.).

Taigi šviesos difrakcija įrodo, kad *balta šviesa yra sudėtinė.*



52.3 pav.

Šviesos bangos ilgio nustatymas

Difrakcine gardele galima labai tiksliai išmatuoti šviesos bangų ilgius. Įstatykime gardelę (*1*) į rėmelį ir žiūrėkime pro ją į skalės (*2*) apšviestą plyšį (*3*) (52.5 pav.). Abipus šviesaus ruožo matysime išsidėsčiusius difrakcinius spektrus (52.4 pav., *c*). Kuo trumpesnė šviesos banga, tuo arčiau centro tos spalvos linijos. Bangos ilgiui rasti pakanka išmatuoti atstumą l nuo difrakcinės gardelės iki skalės ir atskaičiuoti skalėje (*3*) tiriamų spindulių nuokrypą h nuo centrinio balto ruožo. Skaičiuojama pagal formulę

$$\lambda = \frac{dh}{kl}, \qquad (52.1)$$

nesunkiai išvedamą remiantis interferencinio maksimumo sąlyga (51.4).

Difrakcinės gardelės konstanta d visuomet ant jos užrašyta, o k šioje formulėje — spektro eilės numeris (žr. 52.4 pav., *c*). Difrakcinėmis gardelėmis buvo nustatyti įvairių spalvų bangų ilgiai (52.1 lentelė).

Taigi spalva, kaip ir garso tonas, priklauso nuo bangos ilgio (nuo svyravimų dažnio). Tam tikro dažnio oro svyravimus žmogus suvokia kaip tam tikro tono garsą, o tam tikro dažnio šviesos bangas — kaip atitinkamą spalvą (52.6 pav.).

Difrakcija gamtoje ir technikoje

Kartais apie saulę, mėnulį, net apie gatvės žibintus matomi spektro spalvų žiedai. Tai — difrakcijos pasireiškimas šviesai sklindant

a

b

3 2 1 c 1 2 3

52.4 pav.

3 l 2 1

52.5 pav.

DO RE MI FA SOL LIA SI

52.6 pav.

52.1 lentelė. Spalvų ir garsų charakteristikos

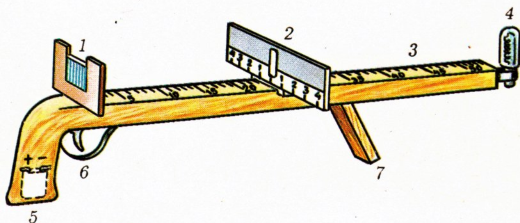
Spalvų charakteristikos			Garsų charakteristikos		
Spalva	Bangos ilgis nm	Virpesių dažnis THz	Tonas	Bangos ilgis m	Virpesių dažnis Hz
Raudona	760—620	400—480	Do	1,27	261,63
Oranžinė	620—590	480—510	Re	1,13	293,66
Geltona	590—560	510—540	Mi	1,01	329,63
Žalia	560—500	540—600	Fa	0,95	349,23
Žydra	500—480	600—620	Sol	0,85	392,00
Mėlyna	480—450	620—670	Lia	0,76	440,0
Violetinė	450—380	670—800	Si	0,67	493,88

pro rūką, plonus debesis arba ledo kristaliukų sluoksnį.

Šviesos difrakciją galima stebėti ir jai atsispindint nuo *atspindžio gardelės* — tankaus tinklo šviesą atspindinčių ir išsklaidančių ruoželių. Pavyzdžiui, pavartę prieš lemputės šviesą patefono plokštelę, pamatysime spektrą, susidariusį šviesai atsispindint nuo plokštelės griovelių ir lygių ruoželių.

Šviesai sklindant pro kristalą, taisyklingai išsidėsčiusios dalelės sudaro natūralią difrakcinę gardelę. Iš taip gaunamų difrakcinių vaizdų nustatoma kristalinės gardelės struktūra, atstumai tarp jos mazgų.

Simas Klaidelė išrado patogų „automatą“ šviesos bangų ilgiui nustatyti (52.7 pav.). Paaiškinkite, kaip juo naudotis ir kokia sunumeruotų detalių paskirtis.



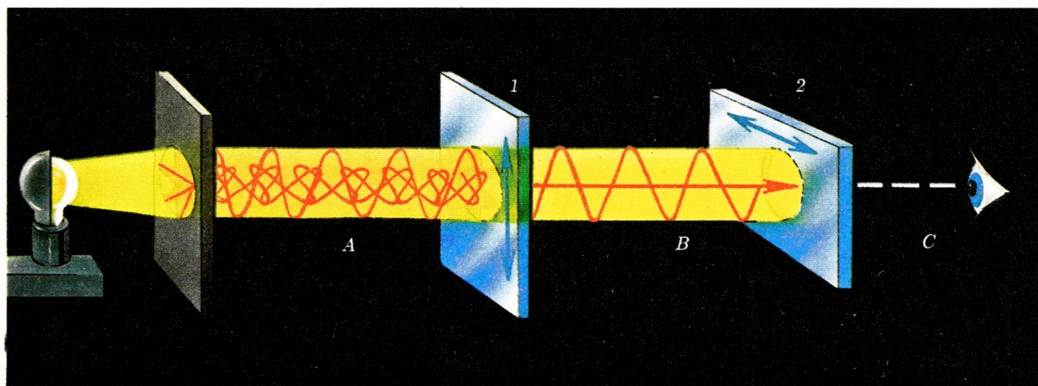
52.7 pav.

52.1. Apšvietus difrakcinę gardelę šviesa, kurios $\lambda = 627$ nm, ekrane, esančiame už 120 cm, susidarė juostos. Atstumas tarp centrinės ir pirmosios juostų lygus 39,6 cm. Apskaičiuokite gardelės konstantą.

52.2. Apšvietus difrakcinę gardelę šviesa, kurios bangos ilgis 656 nm, antrosios eilės spektras matomas 15° kampu. Kokia yra gardelės konstanta?

§ 52.3. Šviesos poliarizacija

Kalbėdami apie šviesos prigimtį, minėjome, kad tai yra *skersinės* elektromagnetinės bangos: kintantys didžiuliu dažniu elektrinis ir magnetinis laukai yra statmeni bangos sklidimo krypčiai. Kadangi mūsų akis, kaip išaiškinta, reaguoja į elektrinio lauko virpesius, tai tik apie juos galime toliau ir kalbėti. Natūralioje šviesoje šie virpesiai vyksta visomis statmenomis spinduliui kryptimis (52.8 pav., *A*). Tačiau kartais ši simetrija sutrinka. Pavyzdžiui, krintant šviesos spinduliui į vandenį 52° kampu arba į veidrodį 55° kampu, atsispindėjęs ir lūžęs spinduliai būna statmeni vienas kitam. Ir tada virpesių kryptys tarsi pasidalija: atsispindėjusiame spindulyje lieka tik vienos krypties virpesiai, lūžusiame — taip pat vienos, pirmiesiems statme-



52.8 pav.

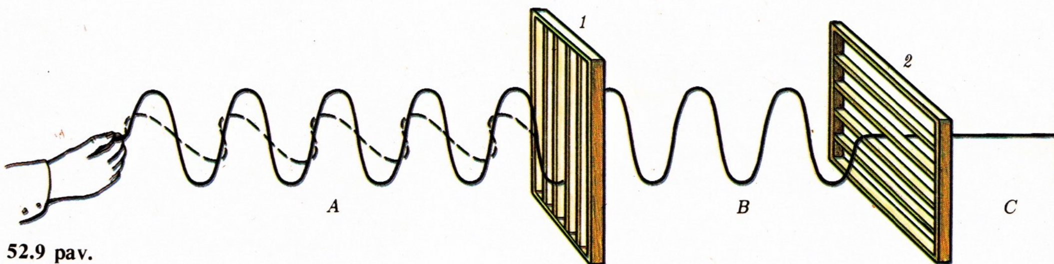
nos krypties virpesiai. Analogiškas reiškinys įvyksta ir šviesai praeinant pro Islandijos špato arba turmalino kristalo plokštelę (*1*) (52.8 pav.). Šviesa, kurioje elektrinio lauko virpesiai vyksta vienoje plokštumoje (52.8 pav., *B*), vadinama **poliarizuota** (tiksliau sakant, plokščiai poliarizuota) šviesa. O tokios šviesos išskyrimas iš natūralios šviesos vadinamas šviesos **poliarizacija.**

Skaidrus, o šviesa nepraeina

Virpesių kryptis poliarizuotoje šviesoje, praėjusioje pro minėtą skaidrią kristalinę plokštelę, priklausys nuo to, kaip toji plokštelė išpjauta iš kristalo, t. y. kokia kryptimi turi skverbtis šviesa pro kristalinę gardelę. Padėkime poliarizuotos šviesos kelyje antrą poliarizuojančią plokštelę (*2*). Jei plokštelių kristalinės gardelės bus orientuotos vienodai, šviesa praeis ir pro antrą plokštelę. Sukant antrąją plokštelę toje pačioje plokštumoje, šviesa silpnės. O kai vienodo dalelių išsidėstymo plokštumos abiejose plokštelėse taps statmenos, šviesa visai išnyks (52.8 pav., *C*).

Mechaninis poliarizacijos modelis

Skersinių bangų poliarizaciją galima pailiustruoti praleidžiant guminės virvutės svyravimus pro dvejas groteles su siaurais plyšiais (52.9 pav.). Greitai keičiant virvutės svyravimų kryptį, galima sukelti erdvėje visą pluoštą svyravimų — sukurti mechaninį šviesos spindulio modelį (*A*). Pro pirmąsias groteles praeis tik vienos krypties svyravimai — poliarizuota banga (*B*). Jeigu



52.9 pav.

antrų grotelių plyšiai bus lygiagretūs pirmųjų plyšiams, tai svyravimai laisvai sklis pro abi groteles. Sukant antrąsias groteles, svyravimai silpnės, o grotelių plyšiams sudarius statų kampą, visai nuslops (*C*).

Poliaroidai

Šviesą poliarizuoja ne vien Islandijos špato ir turmalino kristalai, bet ir daugelis kitų medžiagų. Labai stipria poliarizacija pasižymi *herapatito* kristalai. 0,1 mm storio herapatito sluoksniu padengta plona lanksti celiuloido plėvelė visiškai poliarizuoja praeinančią šviesą. Tokia optinė sistema vadinama **poliaroidu** arba **poliarizaciniu šviesos filtru.** Poliaroidiniai akiniai saugo nuo saulės akinimo, pro juos žiūrimi stereofilmai ir stereoskopinės (erdvinės) fotografijos. Padengus automobilių priekinius stiklus ir žibintus poliaroido plėvelėmis, vairuotojų neakina priešais važiuojančių mašinų šviesa.

Įvairūs poliarizaciniai prietaisai plačiai naudojami moksliniuose tyrimuose ir technikoje.

? *1. Sugalvokite šviesos difrakcijos apibrėžimą.*
2. Nematydami nutolusių miške draugų, imame juos šaukti. Kodėl medžiai užstoja šviesą, bet neužstoja garso?
3. Dūdų orkestras žygiuodamas pasuko į kitą gatvę. Kodėl po kurio laiko liko girdimi tik būgno ir bosinių dūdų garsai?
4. Pažiūrėję į elektros lemputę per ištemptą nosinę, matome šviečiantį siūlelį, apsuptą vaivorykštės spalvų aureole. Kodėl?

52.3. Difrakcinėje gardelėje įrėžta 125 brūkšneliai milimetre. Ekranas nutolęs nuo jos 2,5 m. Apšvietus gardelę šviesa, kurios bangos ilgis 420 nm, ekrane matomos mėlynos linijos. Koks yra atstumas tarp centrinės ir pirmosios linijų?

52.4. Pilnutinės poliarizacijos kampu vadinamas toks kampas, kuriuo krintantis į aplinkų ribą šviesos spindulys atsispindi pilnutinai poliarizuotas. Apskaičiuokite pilnutinės poliarizacijos kampą spinduliui krintant iš oro į vandenį.

4.4 skyrius

SPINDULIAVIMAS IR SPEKTRAI

53 paskaita

ŠVIESOS ANATOMIJA

„Kuo daugiau spalvų mato žmogus pasaulyje, tuo jis laimingesnis.“

Japonų patarlė

§ 53.1. Šviesos dispersija

Spalvingiausias optikos bandymas

Užtemdytoje patalpoje nukreipkime į ekraną siaurą projekcinio aparato šviesos pluoštą. Šviesos kelyje pastatykime skaidrią stiklinę prizmę (53.1 pav., *a*). Ekrane sužėrės nuostabių vaivorykštės spalvų juosta — **šviesos spektras.** Baltos šviesos skaidymasis į spektrą vadinamas **šviesos dispersija.**

Truputis istorijos

Spalvų atsiradimo iš baltos šviesos ir kūnų spalvos mįslės daugelį šimtmečių domino fizikus ir ne vien fizikus. Spalvų žaismas deimanto briaunose ir krištolo sietynuose buvo seniai žinomas, tačiau niekas nedrįso suabejoti baltos šviesos vientisumu. Buvo manoma, kad medžiaga „nudažo“ pro ją praėjusią šviesą. Italų vienuolis Markas Dominijus 1611 m. buvo nunuodytas ir viešai sudegintas kartu su savo knyga „Apie vaivorykštę ir spalvas“, kurioje bandė kitaip aiškinti spalvų ir vaivorykštės susidarymo priežastis.

Tik po 55 metų, 1666 m. anglų fizikas Izaokas Niutonas kruopščiai ištyrė ir moksliškai paaiškino šviesos dispersiją. Niutonas įvedė „spektro“ (lot. *spectrum* — vaizdas) terminą ir, remdamasis analogija

su garso oktava, padalijo spektrą į septynias spalvas: *raudoną, oranžinę, geltoną, žalią, žydrą, mėlyną* ir *violetinę,* kurios palaipsniui pereina viena į kitą (52.6 pav.). Taip išsidėsto praėję pro prizmę spinduliai bangos ilgio mažėjimo tvarka (52.1 lentelė).

Trys išvados, sukrėtusios viduramžių optiką

Niutonas atskyrė kiekvienos spalvos spindulių pluoštelį ir nukreipė jį į antrą prizmę. Nei vienas jų daugiau nesiskaidė į sudėtines dalis (53.1 pav., *b*), bet kiekvienos spalvos spinduliai lūžo skirtingai: mažiausiai nukrypo raudoni spinduliai, daugiausiai — violetiniai. Nukreipęs viso spektro spindulius į atvirkščiai pastatytą prizmę, Niutonas vėl atkūrė baltą šviesą (53.1 pav., *c*).

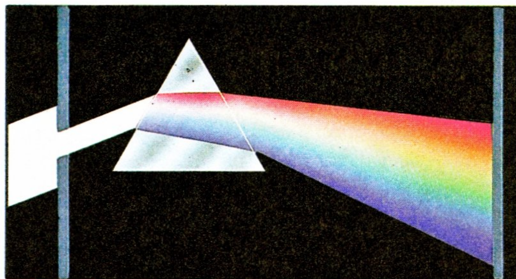
Remdamasis eksperimento rezultatais, Niutonas pareiškė, kad *balta šviesa yra sudėtinė, sudaryta iš spektro spalvų.* Prizmė ne nuspalvina, o *išskaido* šviesą į sudėtines dalis. *Vienos spektro dalies spinduliai daugiau nesiskaido* — jie yra vienalyčiai.

Įvairių spalvų spinduliai skiriasi ne tik sukeliamu regėjimo pojūčiu, bet ir fizikinėmis charakteristikomis: *kiekvienos spektro spalvos spinduliams būdinga kitokia lūžio rodiklio vertė.*

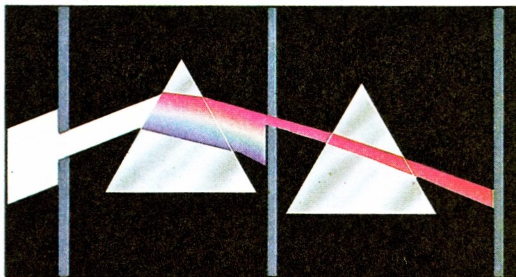
Poetas prieš fiziką

Niutono išvados prieštaravo visoms to meto šviesos teorijoms. Todėl nenuostabu, kad jo atradimą daug kas sutiko priešiškai. Niutoną kritikavo ne vien fizikai. Net po šimto metų J. Gėtė vis dar „griovė“ Niutono teoriją: „Bet kuri spalva yra tamsesnė už baltą. Balta šviesa negali būti gauta iš tamsos...“,— samprotavo didysis poetas.

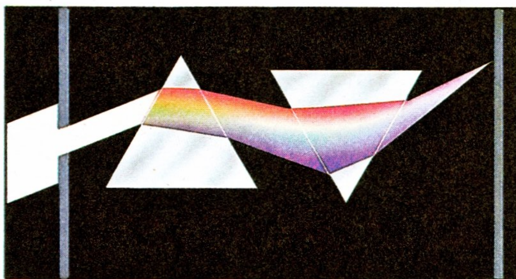

Simas Klaidelė sukūrė dvi šmaikščias greitakalbes: „Ruošėsi Ožys Ganytis, Žolę Žlembt, Miške Vartytis“, ir „Raudonai, O Gal Žaliai, Žydi Marių Vandenai“.
Ką bendro jos turi su fizika ir tarp savęs?



a



b



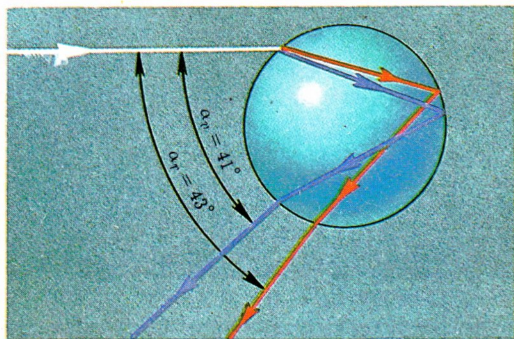
c

53.1 pav.

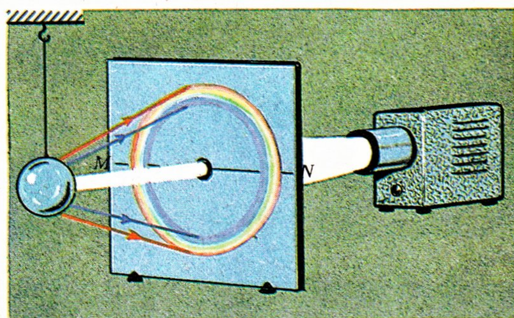
§ 53.2. Kūnų spalvos

Kodėl žolė žalia?

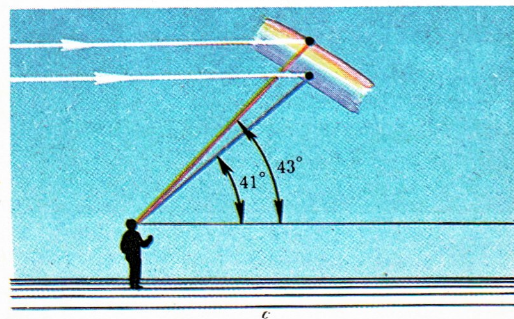
Žinant baltos šviesos sudėtį, galima paaiškinti, kodėl kūnai yra spalvoti. *Baltas atrodo tas kūnas, kuris atspindi visų spektro spalvų spindulius. Daiktai, sugeriantys visų spalvų spindulius, atrodo juodi.* Kūnai, kurie vienokius spindulius sugeria, o kitokius atspin-



a



b



c

53.2 pav.

di,— spalvoti. *Atspindėtoje šviesoje kūnai yra tos spalvos, kurios spindulius atspindi jų paviršius.* Dažniausiai kūnai daugiau ar mažiau atspindi kelių spalvų spindulius. Įvairia proporcija susimaišę spinduliai sudaro tą spalvų įvairovę, kurią matome gamtoje.

Kodėl dangus mėlynas?

Skaidrūs kūnai praeinančioje šviesoje yra tos spalvos, kurios spindulius jie praleidžia. Šviesoforo stiklas atrodo žalias todėl, kad jis yra skaidrus žaliai šviesai, o kitokius spindulius sugeria. Raudona šviesa apšviestas žalias stiklas atrodys juodas. Panašiai „nusidažo“ ir dangaus mėlynė.

Kas nuaudė laumės juostą?

Lygiagrečių spindulių pluoštą nukreipkime pro angą ekrane į stiklinį rutuliuką arba į nedidelę apvalią kolbą su vandeniu. Spinduliai rutuliuke luš ir atsispindės nuo vidinio paviršiaus (53.2 pav., *a*). Iš rutuliuko spinduliai išeis spalvotu kūgio pavidalo pluoštu ir apšvies ekraną (53.2 pav., *b*). Išorinis kūgio paviršius bus raudonos, vidinis — violetinės spalvos, o tarp jų bus visos kitos vaivorykštės spalvos. Nubrėžę ekrane horizonto liniją *MN*, turėsime vaizdžią vaivorykštės imitaciją.

Gamtoje šviesą skaidančių rutuliukų vaidmenį atlieka ore pakibę vandens lašeliai. Vaivorykštė matoma tada, kai stebėtojas žiūri, nusisukęs nuo saulės, į vandens lašelių pilną orą. Kiekvienas stebėtojas mato „savo“ vaivorykštę, sudarytą „savo“ lašelių. Tie lašeliai, kurie, žiūrint iš stebėtojo taško, kybo 41° kampu virš horizonto, siunčia stebėtojui violetinę šviesą, o tie, kurie 43° kampu,— raudoną (53.2 pav., *c*).

▲ **53.1.** Bandymu buvo nustatyta, kad vandens lūžio rodiklis kraštiniams raudoniems regimosios šviesos spinduliams lygus 1,329, o kraštiniams violetiniams — 1,344. Kokiu greičiu sklinda vandeniu raudoni ir violetiniai spinduliai?

---

§ 53.3. Nematomosios spektro dalys

„Šiltos" ir „šaltos" spalvos

1800 m. anglų astronomas ir fizikas Fridrikas H e r š e l i s (1738—1822) užsibrėžė patikrinti, ar tikrai, kaip tuomet buvo manoma, saulės šiluma tolygiai pasiskirsčiusi jos spektre. Jautriu termometru Heršelis matavo ekrano temperatūrą tose vietose, kur krinta įvairių spalvų spinduliai, ir įsitikino, kad nuo *violetinio spektro krašto link raudonojo temperatūra tolygiai kyla.* Maža to — temperatūros maksimumas buvo už raudonosios spektro ribos, t. y. ten, kur akys jau nieko nematė. Taigi Heršelis nustatė, kad esama nematomų šiluminių saulės spindulių, kuriuos prizmė atlenkia dar mažiau negu raudonuosius. Šiuos spindulius Heršelis pavadino **infraraudonaisiais** (lot. *infra* — žemiau, po). Infraraudonieji spinduliai sklinda nuo visų kūnų, kurių temperatūra aukštesnė už aplinkos temperatūrą, taigi ir nuo šiltakraujų gyvūnų.

Infraraudonųjų spindulių bangos ilgių diapazonas labai platus — nuo 760 nm iki $3 \cdot 10^3$ μm. Jie atneša per 70% Saulės spinduliavimo energijos.

Heršelio atradimą T. Jungas pavadino „didžiausiu atradimu nuo Niutono laikų".

Infraraudonųjų spindulių panaudojimas

Infraraudonieji spinduliai giliai įsiskverbia į žmogaus bei gyvūnų kūną ir teigiamai veikia visus gyvybinius procesus. Jais gydomi lėtiniai uždegimai, malšinamas skausmas.

Naudojant infraraudoniesiems spinduliams jautrias fotomedžiagas, galima fotografuoti tamsoje. Karyboje infraraudonieji spinduliai naudojami raketoms nukreipti į šiluminius taikinius. Sukurti naktiniai žiūronai ir optiniai taikikliai, kurie infraraudonuosius spindulius pakeičia regimaisiais. Pramonėje infraraudonaisiais spinduliais džiovinami vaisiai, mediena, dažų ir lako dangos.

Žemė — šiltnamis

Šiltnamio stiklas gerai praleidžia regimąją šviesą ir trumpesnių bangų infraraudonuosius spindulius. Nuo jų gruntas įšyla ir ima skleisti ilgesnių bangų infraraudonuosius spindulius, o pastaruosius stiklas sulaiko. Tokiu būdu šiltnamyje kaupiasi šiluma.

Žemės atmosfera, panašiai kaip šiltnamio stiklas, praleidžia saulės spindulius ir sulaiko ilgabangį žemės spinduliavimą, todėl pakelia žemės paviršiaus ir apatinių oro sluoksnių temperatūrą. Šis reiškinys vadinamas **šiltnamio efektu.**

Dar vienas atradimas spektre

1802 m. vokiečių fizikas Johanas R i t e r i s (1776—1810) tyrė įvairių spalvų spindulių cheminį veikimą. Riteris atrado, kad sidabro chloridas (šviesai jautri medžiaga) apšviestas patamsėja tuo labiau, kuo spindulių spalva yra arčiau spektro violetinio krašto. Maža to, jis patamsėjo dar labiau palaikytas už violetinės spektro ribos — ten, kur akys jau nieko nematė. Taip Riteris nustatė, jog yra dar viena nematoma saulės spektro dalis — spinduliai, kuriuos prizmė atlenkia daugiau negu violetinius. Šiuos spindulius Riteris pavadino **ultravioletiniais** (lot. *ultra* — virš, už). Ultravioletinių spindulių diapazonas labai platus — nuo 10 iki 400 nm.

Ultravioletinių spindulių panaudojimas

Daugelis šviesai skaidrių medžiagų nepraleidžia arba blogai praleidžia ultravioletinius spindulius. Smarkiai juos sugeria žemės atmosfera, todėl aukštai kalnuose jų būna kur kas daugiau. Langų stiklas praleidžia tik nežymią ultravioletinių spindulių dalį. Laidus ultravioletiniams spinduliams yra

kvarcinis stiklas, išlydytas iš gryno kvarcinio smėlio. Techninis ultravioletinių spindulių šaltinis yra *kvarco lempa.* Tai kvarcinio stiklo vamzdelis, kuriame elektros išlydis gyvsidabrio garuose sukelia stiprų regimąjį ir ultravioletinį spinduliavimą.

Ultravioletiniai spinduliai jonizuoja orą, sukelia kai kurių medžiagų švytėjimą, efektyviai naikina bakterijas. Mažos ultravioletinių spindulių dozės žmogaus ir gyvūnų organizmą veikia teigiamai — skatina vitamino D gamybą, didina atsparumą infekcijoms. Ultravioletiniais spinduliais gydomas rachitas, žaizdos. Žiemą ultravioletiniais spinduliais švitinami tvartuose gyvuliai ir paukščiai.

Didelės ultravioletinių spindulių dozės sukelia nudegimus, saulės smūgį, pažeidžia akis, nervų ir kraujotakos sistemas.

? *1. Raudoną, oranžinę ir geltoną spalvas dailininkai vadina „šiltomis“, o žydrą, mėlyną ir violetinę — „šaltomis“. Ar turi toks spalvų skirstymas fizikinį pagrindą?*
2. Ar skleidžia elektromagnetines bangas kėdė, ant kurios sėdite, knyga, kurią skaitote?
3. Kodėl vaivorykštės negalima matyti vidurdienį?
4. Kodėl mėlynas stiklas prieš saulę labiau įšyla negu raudonas?

53.2. Stiklu (lengvuoju kronu) kraštiniai regimosios šviesos raudonieji spinduliai sklinda $199 \cdot 10^3$ km/s greičiu, o kraštiniai violetiniai — $196 \cdot 10^3$ km/s greičiu. Apskaičiuokite stiklo lūžio rodiklį raudoniesiems ir violetiniams spinduliams.

---

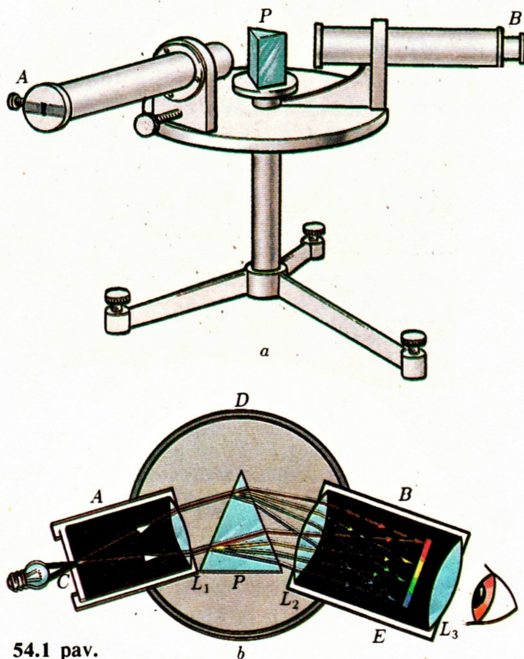
54 paskaita

SPEKTRAI ATSKLEIDŽIA MATERIJOS PASLAPTIS

§ 54.1. Prietaisai spektrams tirti

Prietaisai, skirti spektrams vizualiai tirti, vadinami **spektroskopais.**

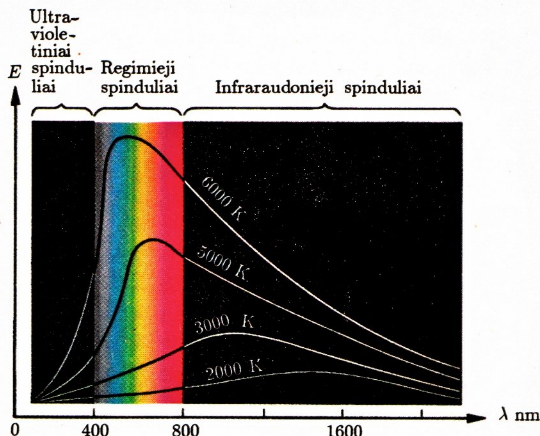
Spektroskopas susideda iš trisienės prizmės (P) ir dviejų vamzdžių — kolimatoriaus (A) ir žiūrono (B) (54.1 pav., *a, b*). Viename kolimatoriaus gale yra diafragma C su siauru plyšiu, o kitame — glaudžiamasis lęšis L_1. Kolimatoriaus diafragmos plyšys nukreipiamas į tiriamąjį šviesos šaltinį. Nuo pašalinės šviesos prizmė uždengta gaubtu D. Lęšis L_1 koncentruoja spindulius į prizmę, o prizmė juos išskaido į spektrą. Lęšis L_2 sufokusuoja spektrą į ekraną E



54.1 pav.

(matinį stiklą). Spektras stebimas pro didinantį žiūrono okuliarą L_3. Jeigu vietoj ekrano įdedama fotoplokštelė ir spektrai fotografuojami, tai toks prietaisas vadinamas **spektrografu.**

Nematomoms spektro dalims — infraraudoniesiems ir ultravioletiniams spinduliams — tirti spektrografų prizmės turi būti iš tuos spindulius praleidžiančių medžiagų — kvarco arba akmens druskos kristalų.



54.2 pav.

§ 54.2. Energijos pasiskirstymas ištisiniame spektre

Praeitoje paskaitoje nagrinėtieji spektrai, sudaryti iš tolygiai besikeičiančių vaivorykštės spalvų, vadinami **ištisiniais spektrais.** Juos gauname išskaidę šviesą, kurią skleidžia dauguma šviesos šaltinių — *visi įkaitę kietieji ir skystieji kūnai.*

Spinduliavimo „pasas“

Šviesos šaltinį apibūdina jo galia — energijos kiekis, išspinduliuojamas per vieną sekundę. Kyla klausimas: *kokia dalis tos energijos tenka įvairių bangos ilgių spinduliams?* Tai labai svarbu žinoti sprendžiant daugelį mokslo ir technikos uždavinių.

Spinduliuojamos energijos pasiskirstymas pagal bangos ilgius nustatomas bandymais: išskaidžius spindulius prizme, jautriais elektriniais prietaisais (bolometrais) matuojama energija, tenkanti siauriems spektro ruožams. Remiantis bandymo rezultatais brėžiamos kreivės.

54.2 paveiksle atvaizduotos kreivės, rodančios, kaip įvairios temperatūros kūnų (nuo 2000 iki 6000 K) spinduliavimo galia priklauso nuo bangos ilgio. Matome, kad tokios temperatūros kūnai, be regimųjų, skleidžia infraraudonuosius bei ultravioletinius spindulius, be to, regimoji sritis sudaro tik nedidelę viso spektro dalį. Kylant kūno temperatūrai, kreivės maksimumas slenka trumpesnių bangų pusėn. Kiekvieną temperatūrą atitinka tam tikras vyraujantis bangos ilgis — tam tikra spalva. Remiantis šiais grafikais *pagal spinduliuojančio kūno spalvą galima nustatyti jo temperatūrą.* Šiuo principu veikia optinis prietaisas aukštoms temperatūroms matuoti — **pirometras.** Pirometro objektyvas nukreipiamas į metalo lydymo krosnies, plazmos ar lempos siūlelio šviesą, o skalėje atskaitoma kūno temperatūra.

Saulės spektre energijos maksimumas tenka geltoniesiems spinduliams. Tai atitinka 6000 K temperatūrą. Žvaigždės, kurių spinduliavimo maksimumas žydrųjų spindulių srityje, yra maždaug 30 000 K temperatūros, o raudonosios žvaigždės yra palyginti šaltos, jų temperatūra tik 3000 K (§ 68.2).

§ 54.3. Emisijos ir absorbcijos spektrai

Trys emisijos spektrų tipai

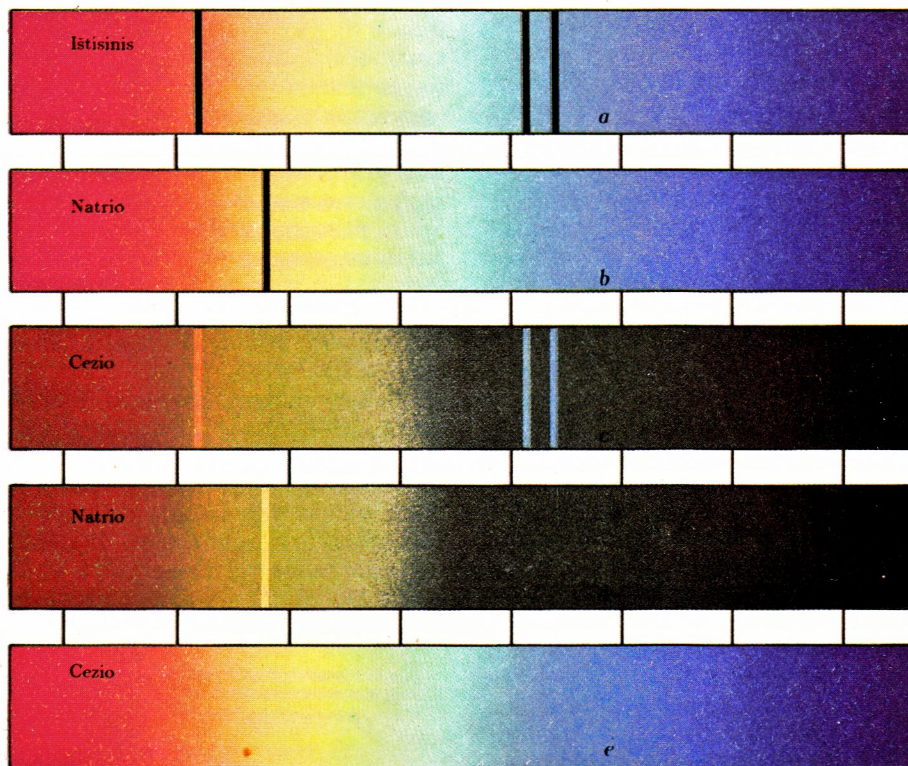
Spinduliavimo, arba **emisijos,** spektrai, be jau minėtų ištisinių (54.3 pav., *a*), gali būti linijiniai ir juostiniai.

Nukreipę spektroskopą į šviečiančias praretintas dujas arba garus (§ 31.3), matysime ne ištisinį spektrą, o tik daugiau ar mažiau atskirų spalvotų linijų juodame fone. Tai — **linijinis spektras.** Kietųjų kūnų arba skysčių linijinį spektrą galime gauti tik juos išgarinę. Linijiniai spektrai skiriasi vieni nuo kitų linijų skaičiumi, išsidėstymu ir spalvomis. Išaiškinta, kad *kiekvienam cheminiam elementui būdingas vis kitoks linijinis spektras.* Jeigu šviečia kelių dujų *mišinys, tai spektre yra visų komponentų* būdingos linijos. 54.3 paveiksle, *b, c,* parodyti natrio ir cezio linijiniai emisijos spektrai. Linijinių spektrų susidarymą lemia procesai, vykstantys atomų viduje (§ 58.3).

Molekulinės struktūros dujų arba garų spektruose linijos yra išplitusios į spalvotas juostas, atskirtas tamsiais tarpais. Tokie spektrai vadinami **juostiniais.**

„Skylėtieji" spektrai

Prieš spektroskopą pastatę vamzdelį su šviečiančiomis dujomis, ekrane matysime jų li-



54.3 pav.

nijinį emisijos spektrą. Dabar išjunkime elektros srovę, kad dujos nustotų švytėti, o už vamzdelio pastatykime baltos šviesos šaltinį. Įvyksta keistas reiškinys: tiksliai tose ištisinio spektro vietose, kur anksčiau švietė dujų emisijos linijos, matome tamsias linijas. Tamsūs ruožai ištisiniame spektre pasirodo kiekvieną kartą, kai baltos šviesos kelyje atsiranda žemesnės temperatūros garai arba dujos. Vadinasi, tam tikrų bangos ilgių spindulius iš praeinančios šviesos dujos sugeria — absorbuoja, o gautasis spektras yra **absorbcijos spektras.** Dujų absorbcijos spektras — tai ištisinis spektras, perkirstas tamsiomis linijomis. 54.3 paveiksle, *d* ir *e*, parodyti natrio ir cezio absorbcijos spektrai.

Pakartoję bandymą su įvairiomis dujomis, įsitikinsime, kad tamsūs ruožai ištisiniame spektre visuomet sutampa su dujų emisijos linijomis (54.3 pav.). Vadinasi, *dujos sugeria tokius praeinančius spindulius, kokius pačios skleidžia, kai jos švyti.* Šį dėsnį atrado ir paaiškino vokiečių fizikas Gustavas Kirchhofas (1824—1887), todėl jis vadinamas **Kirchhofo dėsniu.**

54.4. Spektrinė analizė

Atomų „pirštų atspaudai“

Atskleidus spektrų dėsningumus, atsivėrė galimybė nustatyti medžiagų cheminę sudėtį pagal jų emisijos arba absorbcijos spektrus. Kadangi kiekvienas cheminis elementas skleidžia arba sugeria tik jam vienam būdingas linijas, tai, išgarinus kruopelę tiriamos medžiagos, jos spektre bus visų ją sudarančių cheminių elementų linijos. Vos milijonosios miligramo dalies medžiagos užtenka aiškioms spektro linijoms gauti. Gautąjį spektrą palyginus su žinomais cheminių elementų spektrais ir nustatoma, iš kokių cheminių elementų sudaryta medžiaga. Analizei atlikti naudojami specialūs visų cheminių elementų spektrų atlasai, pasitelkiami kompiuteriai. Pagal įvairių spektro linijų intensyvumą galima nustatyti ir medžiagos procentinę sudėtį.

Jeigu spektre atsiras linijų, neatitinkančių nei vienam žinomam elementui, tai galima tvirtinti, kad medžiagoje yra dar nežinomo cheminio elemento. Spektrinės analizės metodais buvo atrasti 25 nauji cheminiai elementai: cezis, talis, indis, galis, rubidis ir kiti.

Helis — „kilęs iš Saulės“

1868 m. Saulės spektre buvo atrastos Žemėje nežinomo elemento linijos. Šis elementas, pavadintas heliu, tik po 27 metų buvo rastas Žemėje.

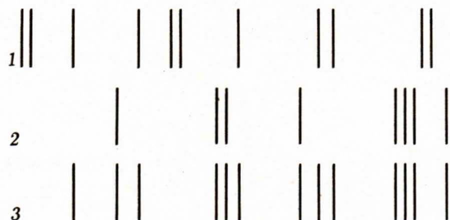
Spektrine analize nustatyta Saulės ir žvaigždžių cheminė sudėtis. Paaiškėjo, kad visi dangaus kūnai sudaryti iš tų pačių elementų kaip ir Žemė.

Plieno analizė per minutę

Spektrinė analizė taikoma geologijoje tiriant mineralų sudėtį, ieškant retųjų metalų, kurių uolienose būna tiek mažai, kad jų neįmanoma aptikti cheminiais metodais. Metalurgijoje spektrine analize nustatomas metalų grynumas, aptinkamos priemaišos. Gamyklų laboratorijose labai sparčiai nustatoma sudėtinga metalo lydinių sudėtis. Spektroskopiniais metodais tiriamas oro grynumas, mineralinių vandenų sudėtis, mikroelementų ir vitaminų kiekis maisto produktuose. Spektrinė analizė — nepakeičiamas teismines ekspertizės įrankis.

Vilniaus fotometrinė sistema

Neįkainojamas žinių šaltinis astronomams yra žvaigždžių spektrai. Spektrų linijos atskleidžia žvaigždžių sandarą, temperatūrą ir spinduliavimo galią. Grupė Lietuvos astronomų, vadovaujami profesoriaus Vy-



54.4 pav.

tauto S t r a i ž i o, sukūrė tobulą žvaigždžių tyrimo metodą, šiuo metu vadinamą **Vilniaus fotometrine sistema.** Dabar Vilnius yra žymus žvaigždžių fotometrijos centras. Vienu metu V. Straižys yra buvęs Tarptautinės astronomų sąjungos žvaigždžių klasifikacijos komisijos prezidentu.

Žvaigždžių greičio matuokliai

Turbūt esate pastebėję, kad, pravažiuojančiam traukiniui arba automobiliui nutolstant, jo keliamo triukšmo tonas žemėja. Ypač tai žymu, jeigu transportas artėja ar tolsta signalizuodamas: kol garso šaltinis artėja, girdime aukštesnio tono garsą, o kai tolsta — žemesnio. Vadinasi, garso šaltiniui artėjant garso bangos trumpėja, o tolstant — ilgėja. Austrų fizikas ir astronomas Christijanas D o p l e r i s (1803—1853) ištyrė šį reiškinį ir nustatė, kaip garso tonas priklauso nuo to, kokiu greičiu ir kuria kryptimi stebėtojo atžvilgiu juda garso šaltinis. Dopleris atrado, kad *ne tik garso, bet ir šviesos bangų ilgis kinta dėl šaltinio ir stebėtojo judėjimo vienas kito atžvilgiu.* Šis reiškinys pavadintas **Doplerio efektu.**

Tiriant tolimų žvaigždžių ir žvaigždžių spiečių — galaktikų — spektrus, paaiškėjo, kad jų linijos, palyginus su laboratoriniais etalonais, pasislinkusios į ilgųjų bangų pusę, t. y. į raudonąją spektro dalį. Šis reiškinys astronomijoje vadinamas **raudonuoju poslinkiu.** Remiantis Doplerio principu, iš žvaigždžių spektrų raudonojo poslinkio daroma išvada, kad visos galaktikos tolsta ir sklaidosi — Visata plečiasi.

? *1. Analizuodami 54.1 paveikslo kreives, nustatykite, kaip keičiasi bendras spinduliuojamos energijos kiekis kylant kūno temperatūrai.*
2. Sugalvokite spektrinės analizės apibrėžimą.
3. 54.4 paveiksle pavaizduoti du dujų mišinių spektrai (1 ir 3) ir neono spektras (2). Kuriame mišinyje yra neono?
4. Ką galima sužinoti apie lydinį, analizuojant jo spektro linijų intensyvumą?
5. Suformuluokite Doplerio efekto apibrėžimą.

Pakartokite § 32.1.

---

55 paskaita

NEREGIMŲJŲ SPINDULIŲ PĖDSAKAI

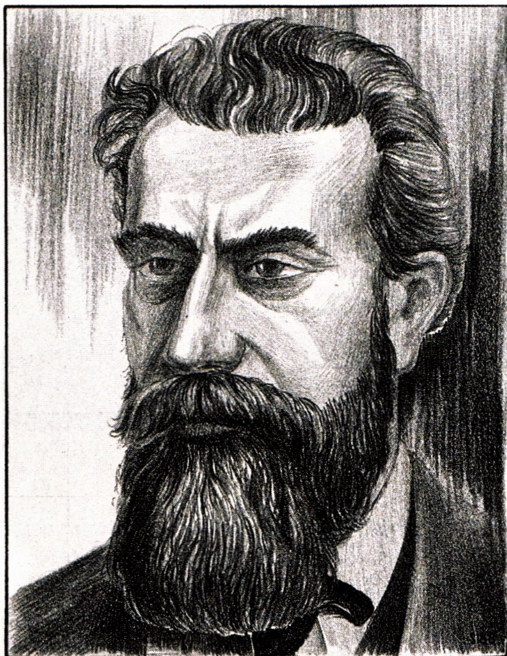
§ 55.1. Rentgeno spinduliai

XIX amžiaus sensacija

XIX amžių galima pavadinti neregimųjų spindulių amžiumi. Buvo atrasti infraraudonieji ir ultravioletiniai spinduliai, radioaktyvusis spinduliavimas ir radijo bangos. Tačiau ir mokslininkus, ir visuomenę labiausiai sudomino vokiečių fiziko Vilhelmo R e n t g e n o (1845—1923) atrastieji spinduliai. 1895 m. Rentgenas pastebėjo, kad, greitų elektronų srautui susidūrus su kokia nors kieta medžiaga, skleidžiami ypatingi spinduliai, kurie prasiskverbia pro šviesai neskaidrias medžiagas. Šie spinduliai vėliau buvo pavadinti **Rentgeno spinduliais.**

Rentgeno spindulių savybės

Patys būdami nematomi, Rentgeno spinduliai sukelia daugelio medžiagų švytėjimą ir stipriai veikia fotografines medžiagas. Prak-



Vilhelmas Rentgenas (1845—1923)

tiškai jiems skaidrios beveik visos medžiagos, ir kuo mažesnis medžiagos tankis, tuo giliau į ją prasiskverbia Rentgeno spinduliai. Tik pakankamai storas švino sluoksnis juos sulaiko. Rentgeno spinduliai smarkiai ardo organizmų ląsteles. Praeidami pro dujas, jas jonizuoja ir padaro laidžias elektrai. Rentgeno spinduliai nenukrypsta nei magnetiniame, nei elektriniame lauke.

Kas gi tie Rentgeno spinduliai?

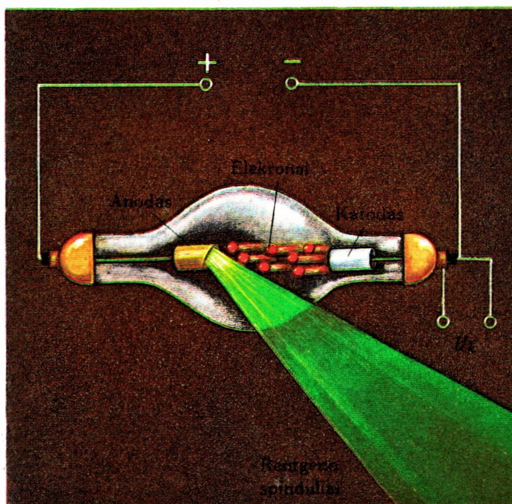
Apibendrinus visas spindulių savybes, buvo padaryta išvada, kad *Rentgeno spinduliai yra labai trumpos elektromagnetinės bangos.* Dabar žinoma, kad jie užima labai platų bangos ilgių intervalą — nuo 10^{-3} iki 10 nm. Vadinasi, prasideda jie ten, kur baigiasi ultravioletiniai spinduliai.

Kaip gaunami Rentgeno spinduliai

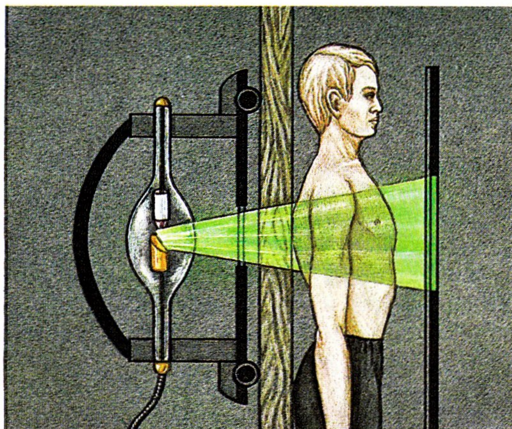
Prietaisas Rentgeno spinduliams gauti vadinamas **Rentgeno vamzdžiu.** Tai stiklinis balionas, iš kurio išsiurbtas oras ir kuriame įtaisyti du elektrodai — anodas ir katodas (55.1 pav.). Katodas yra volframo spiralė, kuri įkaitinta spinduliuoja elektronus. Aukšta įtampa tarp anodo ir katodo (50—200 kV) elektronus įgreitina. Jiems atsitrenkus į metalinį anodą, anodas skleidžia Rentgeno spindulius, kurie išeina pro vamzdžio stiklą.

Kur naudojami Rentgeno spinduliai

Jeigu Rentgeno spinduliai sklinda pro nevienalytę medžiagą, pavyzdžiui, žmogaus kūną, tai įvairios kūno dalys — kaulai, gyslos, raumenys — skirtingai juos praleidžia. Rentgeno aparato (55.2 pav.) švytinčiame ekrane matome žmogaus kaulų (55.3 pav.) ar vidaus organų šešėlį. Ši Rentgeno spindulių savybė panaudojama medicinoje kaulų lūžiams tirti, svetimkūniams ieškoti, ligoms diagnozuoti. Nedidelėmis Rentgeno spindulių dozėmis gydoma.



55.1 pav.



55.2 pav.



55.3 pav.

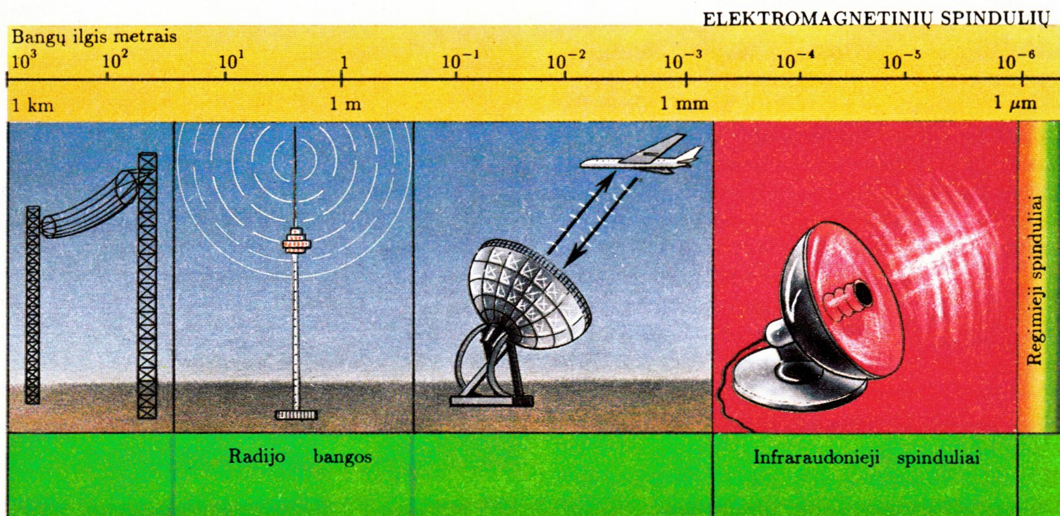
Praeidami pro kūno audinius jie teigiamai paveikia infekcijos židinius, ardo piktybinius auglius.

Metalurgijoje Rentgeno spinduliais aptinkami liejimo defektai: iškilimai, tuštumos, priemaišos.

Peršviečiant Rentgeno spinduliais kristalus, išaiškinama jų vidinė struktūra, nustatomi kristalinių gardelių tipai, tiriami defektai (§ 16.3). Rentgeno analize pavyksta iššifruoti ir sudėtingų organinių junginių, tokių kaip hemoglobinas, struktūrą.

Pripažįstant didžiulę Rentgeno atradimo reikšmę, jam pirmajam iš fizikų buvo paskirta Nobelio premija (1901 m.).

ELEKTROMAGNETINIŲ SPINDULIŲ



§ 55.2. Elektromagnetinių bangų skalė

Vieninga spindulių prigimtis

Rentgeno, ultravioletiniai, infraraudonieji ir regimieji spinduliai yra vienodos prigimties — vienokio ar kitokio ilgio elektromagnetinės bangos. Tos pačios prigimties yra ir radijo bangos. Įvairių spindulių ribos negali būti griežtai nustatytos, nes bangų savybės, kintant bangos ilgiui, nekinta staigiu šuoliu. Pavyzdžiui, neįmanoma tiksliai nurodyti, kur baigiasi ultravioletiniai spinduliai ir prasideda Rentgeno. *Kintant kiekybiškai bangos ilgiui, palaipsniui atsiranda nauja kokybė.*

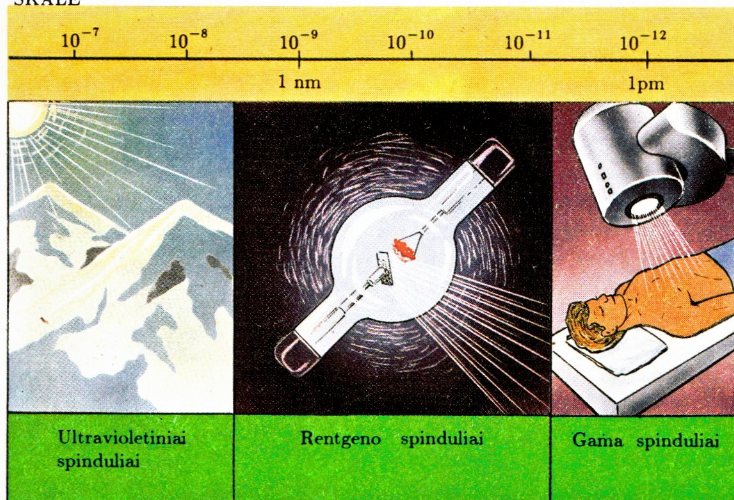
Visos šiuo metu žinomos elektromagnetinės bangos, nuo dešimčių kilometrų ilgio radijo bangų iki trumpiausių 10^{-13} m bangos ilgio gama spindulių, sudaro ištisinę **elektromagnetinių bangų skalę** (55.4 pav.). Ją skirstome į 6 diapazonus: radijo bangos, infraraudonieji spinduliai, regimoji šviesa, ultravioletiniai spinduliai, Rentgeno spinduliai ir radioaktyviųjų medžiagų skleidžiami gama spinduliai. Kaip matome 55.3 paveiksle, regimosios šviesos diapazonas užima tik labai nedidelę elektromagnetinių bangų skalės dalį.

Visos elektromagnetinės bangos turi banginiams procesams bendrų savybių: jos atsispindi, lūžta, interferuoja ir difraguoja. Jos visos yra skersinės bangos. Tačiau kintant bangų ilgiui palaipsniui atsiranda ir ryškėja naujos spindulių savybės. Pavyzdžiui, radijo bangos ir infraraudonieji spinduliai neturi baktericidinių savybių, o šviesa jau naikina daugelio rūšių bakterijas. Dar intensyviau jas naikina ultravioletiniai spinduliai, o Rentgeno spinduliai jau pražūtingai veikia ne tik bakterijas, bet ir gyvąsias ląsteles.

? *1. Tikrinant suvirinimo siūlių kokybę, daromos jų Rentgeno nuotraukos. Kokius defektus tokiu būdu galima nustatyti?*

2. Rentgeno spinduliai praeina net pro sluoksnį metalo. Kodėl gi iš Rentgeno vamzdžių išsiurbiamas oras?

3. Kokia elektromagnetinių bangų savybė vis labiau pasireiškia palaipsniui didėjant virpesių dažniui?



55.4 pav.

4. Kokiais būdais registruojamos įvairių diapazonų elektromagnetinės bangos?
5. Kodėl Rentgeno vamzdžiams reikalinga aukšta — dešimčių ir šimtų kilovoltų — įtampa?

55.1. Į žmogaus akį patenka elektromagnetiniai spinduliai, kurių dažnis $9{,}5 \cdot 10^{14}$ Hz. Ar jie sukelia šviesos pojūtį? Koks tų spindulių bangos ilgis vakuume?

55.2. Kiek kartų Rentgeno spindulių, kurių bangos ilgis 1,0 Å, fotono energija yra didesnė negu geltonos šviesos, kurios bangos ilgis 590 nm?

Pakartokite § 32.2, 33,1, 34.1, 48.3.

4.5 skyrius
KVANTINĖ OPTIKA

„Visiškai nauja ir negirdėta kvanto sąvoka turi sukelti perversmą mūsų fizikiniame mąstyme“.

M. Plankas

56 paskaita
KAIP VEIKIA ELEKTRONINĖS AKYS?

§ 56.1. Fotoefektas

Naujas elektronų gavimo būdas

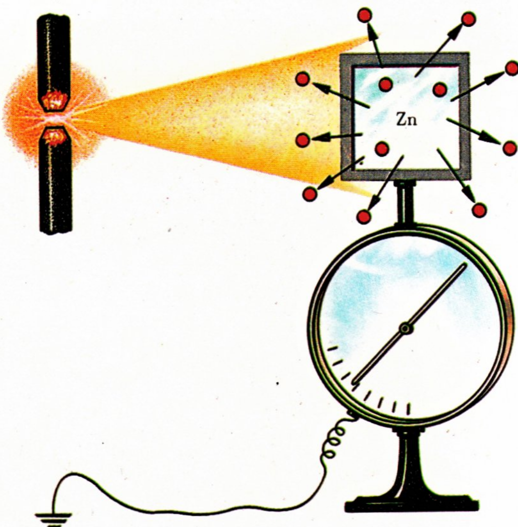
Trumpai aprašant mokslo apie šviesą raidą, buvo paminėtas fotoefekto reiškinys (§ 48.3), ypač pagilinęs banginės šviesos teorijos krizę. **Fotoefektu** (gr. *photos* — šviesa, lot. *effectus* — veikimas) *vadinamas elektronų išlaisvinimas iš medžiagos, veikiant šviesai.* Šį reiškinį atrado Henrichas H e r c a s ir kruopščiai ištyrė rusų, vokiečių, italų fizikai.

Cinko plokštelę prijunkime prie elektroskopo ir įelektrinkime neigiamai (56.1 pav.). Apšvietę plokštelę elektros lanko šviesa, matysime, kad krūvis palaipsniui mažėja. Įelektrinus plokštelę teigiamai, šviesa nedaro įtakos jos krūviui. Tai galima paaiškinti tik vieninteliu būdu: iš cinko paviršiaus šviesa išmuša elektronus. Neigiamai įelektrinta plokštelė atstumia išlaisvintuosius elektronus, ir elektroskopas išsikrauna. Teigiamai įelektrintos plokštelės krūvis nekinta todėl, kad išlaisvintieji elektronai pritraukiami atgal. Šviesos išlaisvintieji elektronai vadinami **fotoelektronais**, o jų kryptingas judėjimas — **fotosrove.**

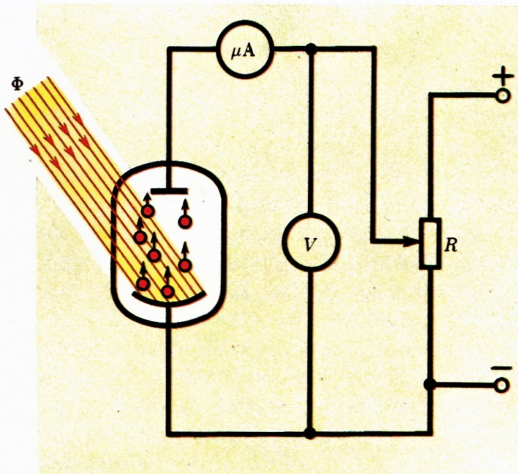
Fotosrovę galima sukurti vakuuminėje lempoje (§ 32.2), kurios katodas — cinko plokštelė. Sudarius įtampą ir apšvietus katodą, grandine tekės fotosrovė (56.2 pav.).

Kodėl fotosrovei negalioja Omo dėsnis?

Fotosrovės stiprumas priklauso nuo įtampos panašiai kaip tekančios dujomis (§ 31.1) arba vakuumu (§ 32.2) srovės stiprumas. Sujunkime 56.2 paveiksle parodytą grandinę.



56.1 pav.



56.2 pav.

Kol neprijungtas išorinis įtampos šaltinis, fotoelektronai daugiausia susikaupia prie katodo, sudarydami tarsi debesėlį. Prijungus įtampos šaltinį ir potenciometru *R* didinant anodo įtampą, fotoelektronų debesėlio tankis mažėja ir srovės stiprumas didėja proporcingai įtampai, tarsi fotosrovei tiktų Omo dėsnis (56.3 pav., grafiko dalis *AB*). Tačiau sudarius tam tikrą įtampą, anodą pasiekia tiek pat fotoelektronų, kiek jų spėja per tą laiką išsilaisvinti iš katodo. Toliau didinant įtampą srovės sustiprinti jau negalima — pasiekta **soties fotosrovė** I_s (grafiko dalis *BC*). Padidinti soties srovę galima tik padidinus krintantį į katodą šviesos srautą Φ (grafiko dalis *B′C′*).

Du fotoefekto dėsniai

Palaipsniui didinant šviesos srautą ir matuojant soties fotosrovę, buvo nustatyta, kad *soties fotosrovės stiprumas yra tiesiog proporcingas krintančiam šviesos srautui.* Tai — **pirmasis fotoefekto dėsnis.**

Kaip matome 56.3 paveikslo grafikuose, fotosrovė teka grandine ir tada, kai anodo įtampa atjungta (grafike jos vertė $OA = I_0$). Tai reiškia, kad fotoelektronai išlekia iš metalo paviršiaus turėdami kinetinės energijos. Sukeitus šaltinio polius, t. y. prijungus šaltinį taip, kad elektrinis laukas stabdytų fotoelektronus, vis mažiau jų pasieks anodą. Tam tikro didumo įtampa U_{st} visiškai sustabdys fotosrovę. Vadinasi, tada net greičiausieji fotoelektronai išeikvos savo kinetinę energiją E_k darbui *A* prieš elektrinio lauko jėgas: $E_k = A$. Iš šios lygybės, įrašius energijos ir darbo išraiškas, galima išsireikšti didžiausią fotoelektronų greitį:

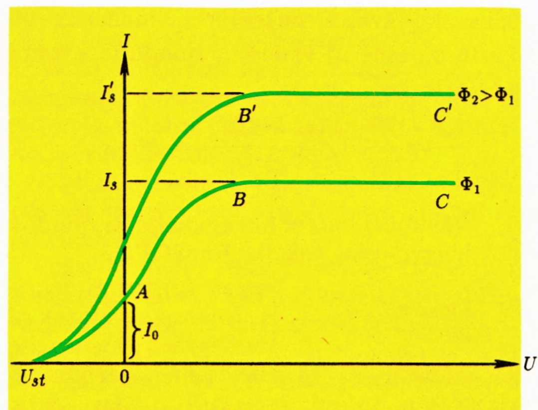
$$\frac{mv^2_{max}}{2} = eU_{st}; \qquad (56.1)$$

čia *m* — elektrono masė, o *e* — elektrono krūvis.

Iš pastarosios lygybės

$$v_{max} = \frac{\sqrt{2eU_{st}}}{m}. \qquad (56.2)$$

Bandymai parodė, kad *didžiausias fotoelektronų greitis nepriklauso nuo apšviestumo — jis priklauso tik nuo spindulių dažnio ir elektrodo medžiagos.* Tai — **antrasis fotoefekto dėsnis.** Mažėjant ap-



56.3 pav.

šviečiančių spindulių dažniui, fotoelektronų pradinė energija mažėja, kol pagaliau tampa lygi nuliui. O dar mažesnio dažnio spinduliai jau visai nesukelia fotoefekto.

Lemtingos išvados

Vadinasi, jeigu spindulių dažnis mažesnis už tam tikrą ribinį dažnį, priklausantį nuo medžiagos, tai fotoefektas nevyksta,— šviesa neišmuša iš tos medžiagos nei vieno elektrono, kad ir koks stiprus būtų spindulių srautas. O apšvietus medžiagą trumpesnės bangos spinduliais, kurie jau sukelia fotoefektą, didžiausias išmuštų elektronų greitis lieka pastovus, kad ir kiek didintume apšviestumą. Šių reiškinių niekaip nebuvo galima paaiškinti remiantis bangų teorija: pagal šią teoriją, stipresnė šviesa turėtų lengviau sukelti fotoefektą ir suteikti fotoelektronams didesnį greitį.

§ 56.2. Kvantinė fotoefekto teorija

Visus fotoefekto reiškinius 1905 m. paaiškino Albertas E i n š t e i n a s remdamasis kvantų teorija (§ 48.3).

Apskaičiavę pagal Planko formulę (48.1) įsitikintume, kad ultravioletinių spindulių kvanto energija ε_u maždaug 50 kartų didesnė už raudonų spindulių kvanto energiją ε_r:

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_r}=\frac{h\nu_u}{h\nu_r}=\frac{2\cdot 10^{16}}{4\cdot 10^{14}}=50.$$

Štai kodėl būtent ultravioletiniai spinduliai lengviausiai sukelia fotoefektą.

Einšteino formulė fotoefektui

Pagal Einšteino teoriją, fotonui susidūrus su medžiaga, jo energija eikvojama darbui A_i elektronui išplėšti iš metalo, o likusi dalis virsta fotoelektrono kinetine energija E_k:

$$\varepsilon=A_i+E_k,$$

arba

$$h\nu=A_i+\frac{mv^2}{2}. \qquad (56.3)$$

Einšteino lygtis — tai energijos tvermės dėsnis, pritaikytas fotoefektui.

Energijos kiekis A_i, suvartojamas elektronui išplėšti iš metalo, vadinamas elektrono **išlaisvinimo darbu.** Kiekvienam metalui jis skirtingas.

Mažiausias dažnis (ν_0), kurio spinduliai dar sukelia metale fotoefektą, vadinamas to metalo **fotoefekto raudonąja riba.** Tokio dažnio fotonų energijos pakanka tik elektronams išmušti iš metalo nesuteikiant jiems greičio ($E_k=0$). Einšteino lygtis šiuo ribiniu atveju:

$$h\nu_0=A_i. \qquad (56.4)$$

Dvi fotoefekto atmainos

Aprašytasis fotoefektas, kai šviesos išlaisvinti elektronai išlekia iš metalo, vadinamas **išoriniu fotoefektu.** Apšvietus kai kuriuos puslaidininkius, pavyzdžiui seleną, valentiniai elektronai, absorbavę fotonus, tampa laisvaisiais, bet lieka medžiagoje. Atsiranda naujų krūvininkų (elektronų ir skylučių), padidėja puslaidininkio laidumas. Šis reiškinys vadinamas **vidiniu fotoefektu.** Papildomas puslaidininkio laidumas, atsiradęs veikiant šviesai, vadinamas **fotolaidumu,** o prietaisai, kurių varža priklauso nuo apšviestumo, vadinami **fotorezistoriais** (§ 33.1).

56.1. Elektronų išlaisvinimo iš sidabro darbas $7{,}85\cdot 10^{-19}$ J. Apskaičiuokite fotoefekto raudonosios ribos bangos ilgį.

56.2. Elektronų išlaisvinimo iš gyvsidabrio darbas 4,53 eV. Ar susidarys fotoefektas, apšvietus gyvsidabrio paviršių regimąja šviesa?

---

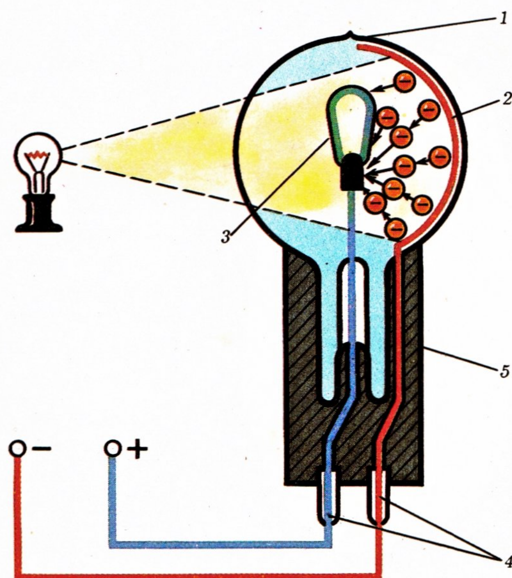
§ 56.3. Fotoefekto praktiniai pritaikymai

Fotoefektas ne vien padėjo suprasti šviesos prigimtį. Jis netrukus buvo pritaikytas praktikoje įvairiuose prietaisuose, kurie šviesos pokyčius pakeičia elektros srovės pokyčiais. Iš tikrųjų, 56.2 paveiksle atvaizduotoji lempa gali kurti srovę, absorbuodama spindulių energiją: silpna fotosrovė teka ir nesant išorinės įtampos. Prietaisas, keičiantis spindulių energiją elektros energija, vadinamas **fotoelementu.**

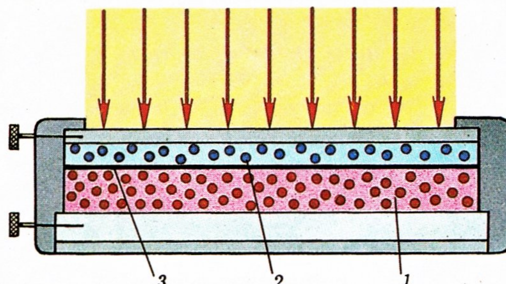
Kita vertus, įjungus išorinį įtampos šaltinį, ši lempa keičia grandine tekančios srovės stiprumą priklausomai nuo katodo apšviestumo, taigi veikia kaip fotorezistorius.

Kaip veikia „elektroninės akys"?

Vakuuminį fotoelementą (56.4 pav.) sudaro stiklinis balionas (*1*), iš kurio išsiurbtas oras. Dalis baliono vidinio paviršiaus padengta šviesai jautriu metalo sluoksniu,— tai fotokatodas (*2*). Anodas yra metalinis žiedas (*3*) įmontuotas baliono viduje. Abu elektrodai įjungiami į grandinę kontaktinėmis kojelėmis (*4*), įtvirtintomis plastmasiniame cokolyje (*5*). Apšvietus katodą, iš jo išlekia fotoelektronai ir skrieja link teigiamo anodo, grandinėje atsiranda fotosrovė. Vakuuminio fotoelemento srovė neinertiška, tiksliai pakartoja šviesos kitimus, todėl šie prietaisai naudojami garsui įrašyti kino juostoje ir įrašytam garsui atgaminti, taip pat apšviestumui matuoti, įvairiems procesams automatiškai valdyti. Derinant fotoelementus ir elektromagnetines reles, konstruojami įvairūs „regintieji" automatai, kuriuose šviesos spindulys įjungia ir išjungia gatvių apšvietimą, švyturius, sustabdo verpimo stakles nutrūkus siūlui, skaičiuoja konvejeriu slenkančias detales, rūšiuoja detales pagal spalvą arba matmenis, perduoda fototelegramas ir t. t.



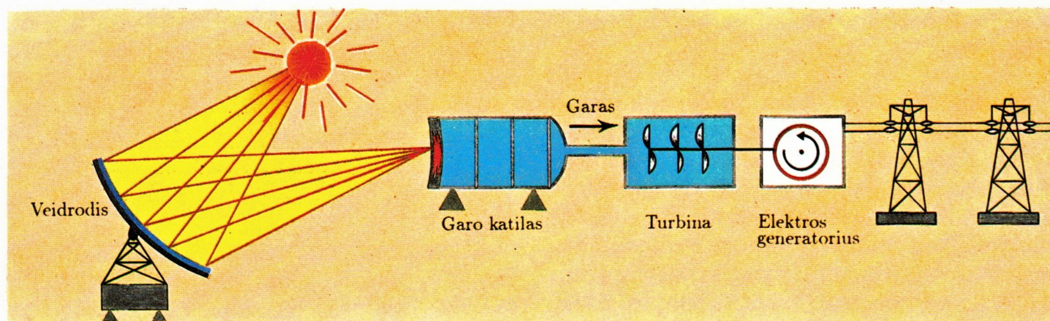
56.4 pav.



56.5 pav.

Tačiau stikliniai fotoelementai yra trapūs, jų gamyba gana sudėtinga, fotosrovė labai silpna.

Šių trūkumų neturi vidinio fotoefekto fotorezistoriai (§ 33.1). Pastarieji maži, nedūžta, pigūs, o jų jautrumas šviesai yra dešimtis kartų didesnis negu vakuuminių fotoelementų. Todėl šiuo metu daugelyje įrenginių fotorezistoriai pakeitė išorinio fotoefekto fotoelementus.



56.6 pav.

Kaip veikia saulės baterija?

Puslaidininkiniuose fotorezistoriuose šviesa tik valdo elektros srovę, o *saulės baterija pati yra elektros srovės šaltinis.* **Spindulių energiją saulės baterija tiesiogiai paverčia elektros energija.**

Saulės baterija sudaryta iš užtvarinių puslaidininkinių fotoelementų. 56.5 paveiksle parodyta tokio fotoelemento konstrukcija.

Elektroninio laidumo silicio plokštelė (*1*) padengiama plonu skylinio laidumo silicio sluoksniu (*2*). Tarp skirtingo laidumo puslaidininkių susidaro užtvarinis *pn* sluoksnis (*3*) (§ 34.1).

Veikiant šviesai silicio sluoksnyje vyksta vidinis fotoefektas: išsilaisvina elektronai ir atsiranda skylės. Veikiami sandūros elektrinio lauko, šie krūvininkai atsiskiria — elektronai pereina į *n* sritį, o skylutės kaupiasi *p* srityje; *pn* sandūroje atsiranda papildomas potencialų skirtumas, vadinamas **fotoelektrovaros jėga** (FEVJ). Sujungus elektrodus, grandine teka fotosrovė. Jos stiprumas priklauso nuo šviesos srauto ir apkrovos varžos.

Žemės palydovuose ir kosminiuose laivuose įrengtos saulės baterijos tiekia elektros energiją aparatūrai. Pietų kraštuose vis daugėja saulės elektrinių (56.6 pav.).

? *1. Paaiškinkite, kodėl fotoefektas vadinamas atvirkščiu Rentgeno spinduliavimui reiškiniu.*
2. Apšvietus neįelektrintą cinko plokštelę (56.1 pav.), elektroskopas įsielektrina teigiamai. Kaip tai paaiškinti?
3. Kodėl vakuuminio fotoelemento anodas daromas žiedo, o ne plokštelės pavidalo?
4. Nurodykite užtvarinio fotoelemento, atvaizduoto 56.5 paveiksle, polius.

56.3. Kokią didžiausią kinetinę energiją turi elektronai, išlekiantys iš kalio paviršiaus, apšviesto 345 nm bangos ilgio spinduliais? Elektronų išlaisvinimo iš kalio darbas 2,26 eV.

56.4. Elektronų išlaisvinimo iš kadmio darbas 4,08 eV. Kokio bangos ilgio spinduliais reikia apšviesti kadmio paviršių, kad, vykstant fotoefektui, didžiausias išlekiančių elektronų greitis būtų $7{,}2 \cdot 10^5$ m/s?

57 paskaita
KODĖL KOMETOS UODEGUOTOS?

„Aš visą gyvenimą kovojau su Maksveliu, nepripažindamas jo šviesos slėgio, ir štai Lebedevas savo eksperimentais privertė mane pasiduoti“.

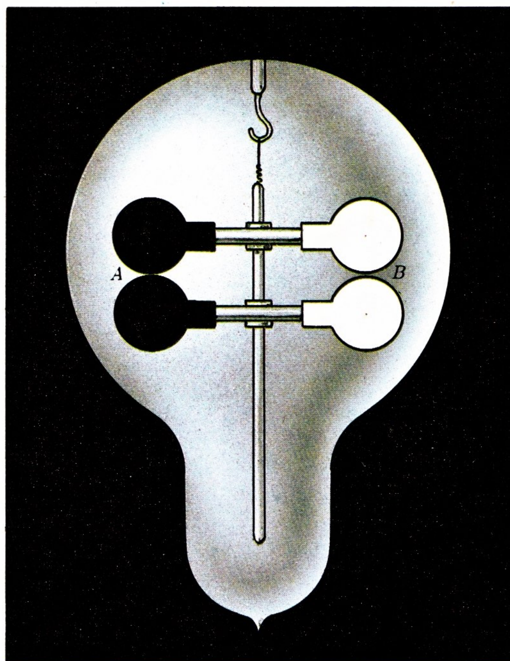
Viljamas Tomsonas

§ 57.1. Šviesos slėgis

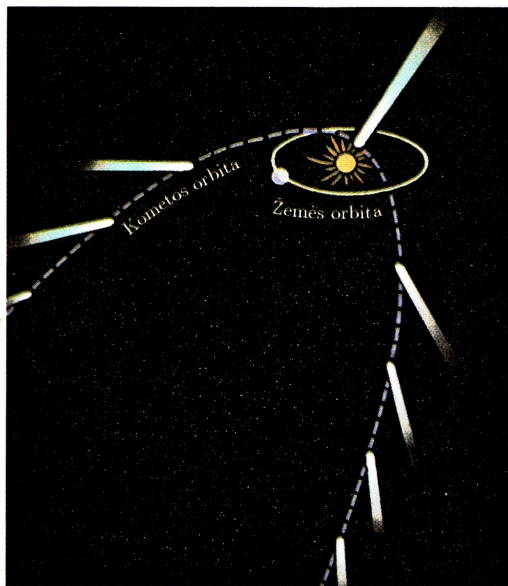
„Uodeguotų žvaigždžių" mįslė

Astronomai seniai susidomėjo, kodėl, kometai artėjant prie Saulės, jos uodega ilgėja ir nukrypsta į priešingą nuo Saulės pusę.

Kometos (gr. *komētēs astēr* — uodeguotos žvaigždės) yra nedideli kosminiai kūnai, skriejantys apie Saulę ištęstomis orbitomis. Kometos išvaizda priklauso nuo atstumo iki Saulės: artėjant prie Saulės, buvęs nedidelis kometos branduolys garuoja ir apsisiaučia dujų skraiste. Taip susidaro *kometos galva,* dažnai matoma net plika akimi. Dar labiau priartėjus prie Saulės, kometos skraistė nutįsta į priešingą nuo Saulės pusę ir susidaro *uodega,* kuri driekiasi milijonus kilometrų. Kuo arčiau Saulės yra kometa, tuo ji šviesesnė ir tuo ilgesnė jos uodega (57.1 pav.).



57.2 pav.



57.1 pav.

Jau 1619 m. vokiečių astronomas Johanas K e p l e r i s mėgino aiškinti kometų uodegų atsiradimą šviesos spindulių slėgiu. Elektromagnetinė šviesos teorija teigia, kad krintanti į kūną šviesa turi jį slėgti. 1873 m. Dž. Maksvelis apskaičiavo, kad Saulės spinduliai, krisdami į juodą paviršių, turi sudaryti $4{,}5 \cdot 10^{-6}$ Pa slėgį.

Unikalus P. Lebedevo eksperimentas

Tik praėjus dvidešimt septyneriems metams po Maksvelio teorijos paskelbimo šviesos slėgį pavyko išmatuoti rusų fizikui Piotrui L e b e d e v u i (1866—1912). Pagrindinė Lebedevo įrenginio dalis buvo lengvi sparneliai, pakabinti ant plono kvarco siūlo gaubte, iš kurio kruopščiai išsiurbtas oras (57.2 pav.). Viena sparnelių pusė buvo juoda, kita — veidrodinė. Lęšių ir



Piotras Lebedevas (1866—1912)

veidrodžių sistema kreipė stiprios šviesos srautą į sparnelius *A* ir *B* iš priešingų pusių. Slegiant šviesai sistema pasisukdavo tam tikru kampu. Pagal kvarco siūlelio susukimo kampą buvo išmatuota sparnelius veikianti jėga, o iš jos apskaičiuotas ir slėgis. P. Lebedevo gauta šviesos slėgio vertė tik apie 20% tesiskyrė nuo Maksvelio teoriškai apskaičiuotosios.

Šviesos slėgis paaiškinamas ne tik bangine, bet ir fotonine teorija. Fotonai, kaip ir bet kokios judančios dalelės, turi impulsą. Paviršiaus absorbuotas fotonas savo impulsą perduoda absorbavusiam paviršiui. Dvigubai didesnį impulsą paviršius gauna, kai fotonas nuo jo atsispindi, nes fotono turėtas impulsas pakinta ne iki nulio, o iki tokios pat priešingo ženklo vertės. Visų fotonų, krintančių į 1 m^2 per 1 s, impulsų pokyčių suma ir lemia šviesos slėgį. Taigi šviesūs kūnai slegiami labiau negu tamsūs, nes jie fotonus atspindi.

Šviesos slėgis pasireiškia daugelyje gamtos reiškinių. Jis ištęsia kometų uodegas, trukdo gravitacinėms jėgoms suspausti žvaigždes, stabdo dirbtinų Žemės palydovų judėjimą.

§ 57.2. Cheminis šviesos veikimas

Su cheminiu šviesos veikimu susiduriame kasdieną: saulės šviesoje blunka audinių spalvos, įdega kūnas, gelsta fotografijos. Apie šviesos sukeliamas chemines reakcijas žinome ir iš chemijos kurso: pavyzdžiui, vandenilio ir chloro mišinys tamsoje gali išbūti ilgą laiką, o apšviestas sprogsta tarsi parakas nuo kibirkšties; vandenilio peroksidas šviesoje skyla į deguonį ir vandenį. Cheminės reakcijos, kurios vyksta medžiagai absorbuojant šviesos spindulių energiją, vadinamos **fotocheminėmis reakcijomis.** Kuo trumpesnės šviesos bangos, tuo didesnė fotono energija ir tuo intensyviau šviesa sukelia fotochemines reakcijas.

Paslaptingas fotosintezės mechanizmas

Svarbiausia gamtoje vykstanti fotocheminė reakcija yra **fotosintezė** — organinių junginių susidarymas žaliuosiuose augaluose veikiant šviesai. Augalų lapuose esantis chlorofilas šviesos veikiamas sugeria anglies dioksidą ir jį suskaido į anglį ir deguonį, kurį išskiria į atmosferą. Visas Žemės atmosferos deguonis yra atsiradęs fotosintezės dėka ir kas 2000 metų atsinaujina. Kartu žalieji augalai per metus įjungia į sudėtingus organinius junginius — baltymus, riebalus, angliavandenius ir kt.— apie 200 milijardų tonų iš oro paimtos anglies. Taigi žaliame lape vykstantys, veikiant Saulei, procesai teikia mums ir maistą, ir deguonį.

Atkurti fotosintezės reakcijas laboratorijoje dar nepavyko.

Mokykimės fotografijos meno

Bene svarbiausios dirbtinės fotocheminės reakcijos yra fotografiniai procesai — atvaizdų gavimas šviesai jautriose medžiagose. Fotografinis procesas susideda iš trijų dalių: šviesai jautrios emulsijos eksponavimo, atvaizdo išryškinimo ir jo užfiksavimo. Šis procesas, gaminant įprastines fotografijas, pakartojamas du kartus: pradžioje gaunamas negatyvas fotojuostoje arba plokštelėje, po to — popieriuje pozityvas. Stiklinės plokštelės arba celiulioidinės juostos, kuriose gaunamas negatyvinis atvaizdas, yra padengtos šviesai jautria medžiaga — sidabro bromido ($AgBr$) emulsija — ir laikomos tamsoje. Eksponuojant emulsiją, t. y. trumpam atidarius fotoaparato diafragmą, emulsijoje susikuria fotografuojamo objekto neregimas atvaizdas, nes šviesos paveiktuose sidabro bromido kristaliukuose įvyksta vidiniai pakitimai.

Veikiant plokštelę ryškalu, pakitusieji kristaliukai suskyla, išsiskiria sidabras, todėl šviesos paveiktos vietos patamsėja. Gaunamas **negatyvas** (lot. *negativus* — neigiamas): šviesios objekto vietos atvaizde tampa tamsios ir atvirkščiai (57.3 pav., *a*). Kad emulsija nuo šviesos daugiau nesikeistų, likusi šviesai jautri medžiaga išplaunama specialiu tirpalu; ši operacija vadinama **fiksavimu.** Užfiksuotas negatyvas plaunamas ir išdžiovinamas.



57.3 pav.

Apšvietus per skaidrų negatyvą padengtą panašia emulsija fotopopierių, gaunamas „negatyvo negatyvas“ — **pozityvas** (lot. *positivus* — teigiamas). Analogiškai jį apdorojus, gaunamas pozityvus atvaizdas — fotografija (57.3 pav., *b*).

Fizikoje fotografija naudojama itin trumpai vykstantiems procesams (pavyzdžiui, žaibui, radioaktyviajam skilimui ir kt.) tirti. Naudojant infraraudoniesiems spinduliams jautrias fotoemulsijas, fotografuojama ir tamsoje.

§ 57.3. Liuminescencija

Kas šviečia, bet nešildo?

Kad atomai spinduliuotų šviesą, jie turi įgyti energijos. Švytėjimas, kurį sukelia nešiluminiai energijos šaltiniai, vadinamas **liuminescencija,** o medžiagos, gebančios paversti šviesa nešiluminę energiją, vadinamos **liuminoforais.** Švyti specialiais dažais nudažytos laikrodžių rodyklės, kelio ženklai, spektaklių dekoracijos ir ryškios juostos ant lokomotyvų. Šviečia televizorių ekranai, šiaurės pašvaistė ir reklaminės „ugnys“. Tamsoje švyti jonvabaliai, pūvantis kelmas ir kai kurios giluminės žuvys. Daugelis medžiagų švyti apšviestos Rentgeno arba ultravioletiniais spinduliais. Visi minėtieji šviesos šaltiniai yra šalti — jų temperatūra lygi aplinkos temperatūrai.

Keturios šaltos šviesos rūšys

Liuminescencija klasifikuojama pagal švytėjimą sukėlusias priežastis. Cheminių procesų sužadintas švytėjimas vadinamas **chemine liuminescencija.** Gyvų organizmų švytėjimą sukelia taip pat cheminės reakcijos. Jų nepavyko gauti laboratoriniu būdu.

Švytėjimas, kurį sužadina atsimušantis į elektroninio vamzdžio ekraną greitų elektronų pluoštas, plintantis nuo katodo, vadinamas **katodine liuminescencija.** Šios rūšies švytėjimą matome televizorių ir oscilografų ekranuose (§ 32.4).

Praretintų dujų švytėjimas, tekant elektros srovei (§ 31.3), vadinamas **elektroliuminescencija.** Šiaurės pašvaistė — taip pat elektroliuminescencijos reiškinys (§ 31.4).

Švytėjimas, kurį sukelia šviesos ar dar trumpesnės elektromagnetinės bangos, vadinamas **fotoliuminescencija.** Sužadinti dujų, skysčio arba kieto kūno atomai pradeda spinduliuoti patys.

Šviesos akumuliatoriai ir transformatoriai

Vienais atvejais fotoliuminescencija vyksta dar tam tikrą laiką (nuo kelių minučių iki paros) ir nustojus veikti švitinimui, kitais — pasibaigia kartu su švitinimu. Įsidėmėtina, kad dažniausiai liuminoforai skleidžia ilgesnes šviesos bangas už sužadinančias švytėjimą: dalis absorbuotų fotonų energijos virsta šilumine energija, todėl išspinduliuojami mažesnės energijos fotonai. Taip galima nematomą spektro dalį — ultravioletinius spindulius — paversti regimąja šviesa. Ši liuminoforų savybė panaudota *dienos šviesos lempose.* Lempų stiklas iš vidaus padengiamas liuminoforu, kuris absorbuoja ultravioletinius spindulius ir skleidžia regimąją šviesą. Šios lempos yra 3—4 kartus ekonomiškesnės už kaitinamąsias lempas. Liuminoforų cheminę sudėtį galima parinkti tokią, kad švytėjimas būtų kokios norima spalvos, net panašus į dienos šviesą.

? *1. Kokias perspektyvas galima numatyti išmokus vykdyti dirbtines fotosintezės reakcijas?*
2. Kodėl blogai užfiksuotos nuotraukos laikui bėgant tamsėja?
3. Kokių savybių liuminoforus galima vadinti „šviesos akumuliatoriais"?
4. Kodėl liuminoforus galima vadinti „šviesos transformatoriais"?
5. Kokie du fizikiniai reiškiniai užšifruoti šioje mįslėje: „Rado Onelė Girioj Žiburėlį, Žiūri — Mažas Vabalėlis" (žr. § 53.1)?

57.1. Laikydami Žemę absoliučiai juodu kūnu, apskaičiuokite Saulės spindulių slėgį į Žemės rutulį. Žemės spindulys lygus 6400 km.

Pakartokite § 20.1.

---

58 paskaita

ATOMAS — SAULĖS SISTEMOS KOPIJA

Gal elektronai — tai planetos,
Penki žemynai jų būtis:
Menai ir mokslai, sostų gretos,
Karai ir amžių atmintis!

Gal atomas — nepermanyta
Šimtapasaulė visata,
Ten tai, kas čia, tik masto kito,
Ir ko nebus čia niekada.

Valerijus Briusovas, 1922 m.
(Vertė Janina Degutytė)

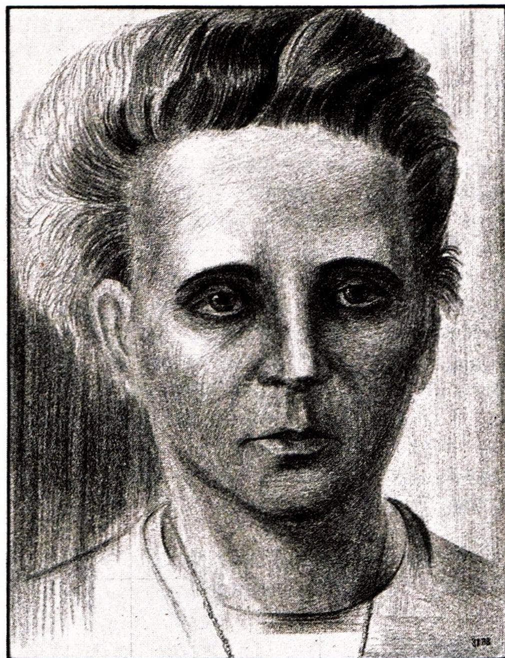
§ 58.1. Radioaktyvumas

Radioaktyvaus spinduliavimo atradimas

Prancūzų fizikas Anri Bekerelis (1852—1908), tirdamas įvairių liuminescuojančių medžiagų cheminį veikimą, 1896 m. atrado paslaptingą urano ir jo junginių spinduliavimą. Nežinomieji spinduliai lengvai praeidavo pro kartoną, medį, žmogaus kūną, sukeldavo fotoemulsijos patamsėjimą ir fluorescuojančio ekrano švytėjimą, išelektrindavo elektroskopą. Tačiau nuostabiausia — *uranas ir jo junginiai spinduliavo*

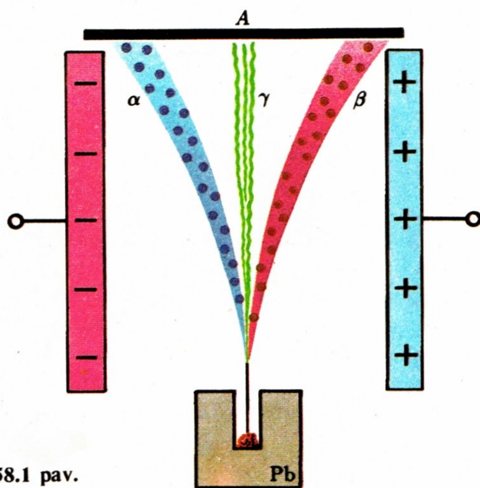
savaime — spontaniškai, nuolatos, be jokio išorinio sužadinimo. Spinduliavimui neturėjo įtakos nei temperatūra, nei slėgis. „Bekerelio spinduliai“ sukėlė pasaulyje tokią pat sensaciją, kaip ir prieš keletą mėnesių atrastieji Rentgeno spinduliai.

Naujai atrastais spinduliais susidomėjo prancūzų fizikai Pjeras Kiuri (1859—1906) ir jo lenkų kilmės žmona Marija Sklodovska-Kiuri (1867—1934). Sutuoktiniai ėmėsi ieškoti kitų panašių į uraną medžiagų. 1898 m. uolienoje, iš kurios išskiriama urano rūda, jie aptiko du naujus spontaniškai spinduliuojančius cheminius elementus. Vieną jų Marijos Kiuri tėvynės Lenkijos garbei jie pavadino *poloniu* (Po), o kitą, spinduliuojantį ypač intensyviai,— *radžiu* (Ra) (lot. *radius* — spindulys). Radis — sidabriškai baltas tamsoje švytintis metalas. 1 g radžio per valandą išskiria 575 J šilumos, todėl jis visada šiltesnis už aplinką. Beje, tai retas elementas: 1 t urano rūdos būna vos 0,2 g radžio. Iki šiol pasaulyje gauta apie 1 kg radžio.



Marija Sklodovska-Kiuri (1867—1934)

Marija ir Pjeras Kiuri savaiminį spinduliavimą pavadino **radioaktyvumu**, o medžiagas, pasižyminčias šia savybe,— **radioaktyviosiomis.** Dabar nustatyta, kad visi cheminiai elementai, kurių eilės numeris didesnis už 83, yra radioaktyvūs.



58.1 pav.

Už savaiminio spinduliavimo atradimą ir radioaktyviųjų medžiagų tyrimus A. Bekerelis, P. Kiuri ir M. Sklodovska-Kiuri 1903 m. buvo apdovanoti Nobelio premija.

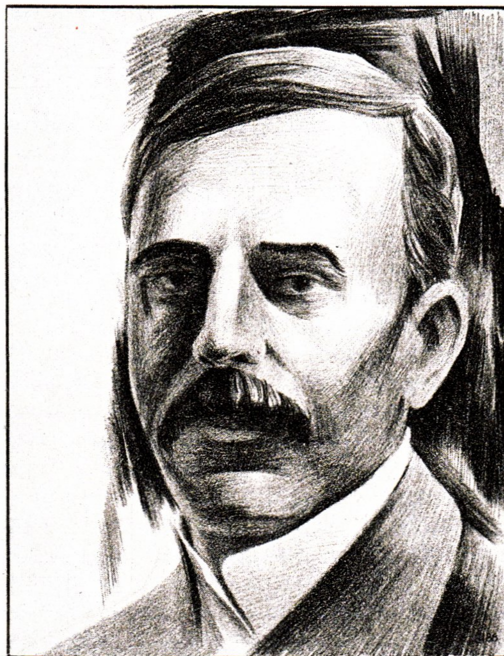
Pirmieji tyrėjai nežinojo, koks pavojingas yra radioaktyviųjų medžiagų biologinis veikimas (§ 64.4). 1934 m. Marija Kiuri mirė nuo spinduliavimo sukeltos leukemijos. Paryžiaus Mokslo muziejuje saugomos jos užrašų knygelės spinduliuoja ir šiandien.

Trejopi spinduliai

Tiriant radioaktyviuosius spindulius, buvo nustatyta, kad magnetiniame arba elektriniame lauke jie išsiskiria į tris pluoštus (58.1 pav.). Dalis spindulių nukrypsta

link neigiamo poliaus (jie pavadinti α spinduliais), kita dalis — link teigiamo poliaus (β spinduliai), o trečio pluošto neveikia nei elektrinis, nei magnetinis laukas (γ spinduliai). Ištyrus greitį, krūvį ir masę, buvo nustatyta, kad α *spinduliai yra teigiamą krūvį turinčių greitai skriejančių dalelių srautas,* β *spinduliai — elektronai, judantys greičiais, artimais šviesos greičiui, o* γ *spinduliai — labai trumpos elektromagnetinės bangos.* α dalelės masė apie 8000 kartų didesnė už elektrono masę, t. y. 4 kartus didesnė už protono masę, krūvis absoliutine verte lygus dvigubam elektrono krūviui.

α ir β daleles sulaiko keleto milimetrų storio metalo sluoksnis, o skvarbiausius γ spindulius gali sulaikyti tik maždaug 20 cm švino sluoksnis.


Ernestas Rezerfordas (1871—1937)

§ 58.2. Planetinis atomo modelis

Netikėtas Rezerfordo atradimas

Elektronų ir α dalelių egzistavimas rodė, kad atomas yra sudėtingos struktūros. Fizikams iškilo nauja mįslė: kaip gi jis sudarytas?

Pirmuosius eksperimentais pagrįstus duomenis apie atomo sandarą gavo anglų fizikas Ernestas R e z e r f o r d a s (1871—1937). Rezerfordas sumanė „peršviesti" atomą radioaktyviaisiais spinduliais, t. y. apšaudyti α dalelėmis ploną medžiagos plėvelę, kad iš to, kaip prasiskverbs tos dalelės pro atomų sluoksnį, būtų galima spręsti apie atomų sandarą. Kitaip tariant, šaudyti smulkiais šratais į „juodą dėžę" ir nustatyti, kas toje dėžėje.

Rezerfordo bandymo schema pavaizduota 58.2 paveiksle, *a*. Radioaktyvaus preparato skleidžiamas α dalelių pluoštelis, praėjęs pro apvalią diafragmą *A*, atsimuša į liuminescuojantį ekraną *B*. Išsiurbus iš prietaiso orą, ekrane prieš diafragmos angą matoma apvali švytinti dėmelė. Padėjus α dalelių kelyje labai ploną (0,1 μm) aukso foliją *C* — maždaug 400 atomų storio,— dauguma dalelių pralėkė pro visus atomus beveik nepakeisdamos krypties. Bet vis dėlto kai kurios dalelės nukrypo didesniais ar mažesniais kampais, sukeldamos ekrano švytėjimą visai netikėtose vietose, o viena kita tiesiog atšoko nuo folijos ir nulėkė atgal (58.2 pav., *b*).

„Tai buvo labiausiai netikėtas įvykis mano gyvenime,— rašė Rezerfordas apie šį atradimą.— Tai buvo bemaž taip pat neįtikėtina, kaip, tarkime, kad 15 colių sviedinys, iššautas į plono popieriaus lapą, jame apsigręžtų ir imtų skrieti į jus. Tada aš pagalvojau, jog atome gali būti mažas masyvus centras, turintis elektros krūvį."

Trys bandymo išvados

Remdamasis bandymo rezultatais, Rezerfordas padarė šias išvadas:

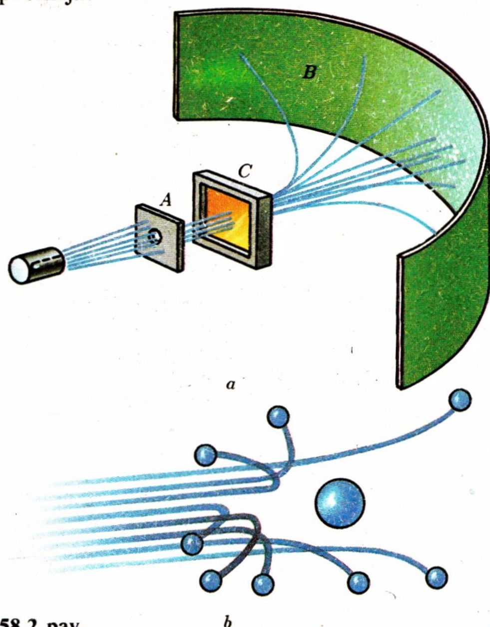
1. *Didžioji atomo tūrio dalis* (99,999%) — *tuštuma* (jei būtų kitaip, dauguma dalelių nepralėktų pro foliją nepakeitusios krypties).

2. *Beveik visa atomo masė (99,5%) ir visas jo teigiamas krūvis sukoncentruoti atomo branduolyje* (nuo branduolio ir atšoka α dalelė).

3. *Elektronai skrieja apie branduolį uždaromis trajektorijomis, panašiai kaip planetos apie Saulę.* (Jeigu elektronai neturėtų reikiamo greičio, branduolys juos pritrauktų). Todėl toks atomo modelis buvo pavadintas **planetiniu.**

Patobulintu Rezerfordo sukurtuoju planetiniu modeliu naudojasi ir šiuolaikinis mokslas apie atomą.

Už nuopelnus tiriant atomo struktūrą E. Rezerfordui 1908 m. paskirta Nobelio premija.



58.2 pav.

Fantastika — tai fizikos šaka

Rezerfordas nustatė, kad atomų branduoliai nepaprastai maži: jų matmenys apie 100 000 kartų mažesni už paties atomo matmenis. Jeigu atomas padidėtų tiek, kad jo branduolys pasidarytų riešuto dydžio, tai elektronai, padidėję sulig aguonos grūdu, skrietų apie jį visą kilometrą nutolusiomis orbitomis.

O jeigu atomų viduje neliktų tarpų, tai daiktai sumažėtų šimtą tūkstančių kartų ir Žemės rutulio spindulys pasidarytų 64 m, o Vilniaus televizijos bokštas — vos 3 mm aukščio... Visatoje yra ir tokio tankio objektų (§ 68.2).

§ 58.3. Boro postulatai*

Dvi sunkios mįslės

Planetinis modelis vaizdžiai paaiškino atomo struktūrą. Tačiau bandant teoriškai pagrįsti elektronų judėjimą orbitomis paaiškėjo, kad Rezerfordo atomas nesuderinamas su tuo, kas buvo žinoma apie elektromagnetinį spinduliavimą. Buvo du esminiai prieštaravimai:

1. Pagal elektromagnetinę teoriją, elektronas skriedamas apie branduolį turi visą laiką spinduliuoti elektromagnetines bangas. Taigi jis turi eikvoti energiją ir palaipsniui spirale artėti prie branduolio. Dėl to per trumpą laiką elektronai nukristų ant branduolio ir atomas nustotų egzistavęs.

2. Dėl tos pačios priežasties elektrono sukimosi periodas turi tolygiai mažėti, o spinduliuojamų bangų dažnis didėti — atomas turi spinduliuoti įvairių dažnių, kitaip sakant, ištisinio spektro bangas.

Iš tikrųjų taip nėra. Atomai egzistuoja

---

* Postulatas — tai kertinis mokslinės teorijos teiginys, priimamas be įrodymo. Fizikoje postulatai remiasi eksperimentiniais faktais.

neribotą laiką visiškai nespinduliuodami energijos, o sužadintas dujų atomas spinduliuoja ne ištisinio, o tik tam elementui būdingo linijinio spektro (§ 54.3) šviesą.

Gamta užminė mokslininkams naujas mįsles: kodėl elektronai, skriedami orbitomis, nepraranda energijos? Kodėl atomai spinduliuoja ir absorbuoja tik tam tikrų ilgių bangas?

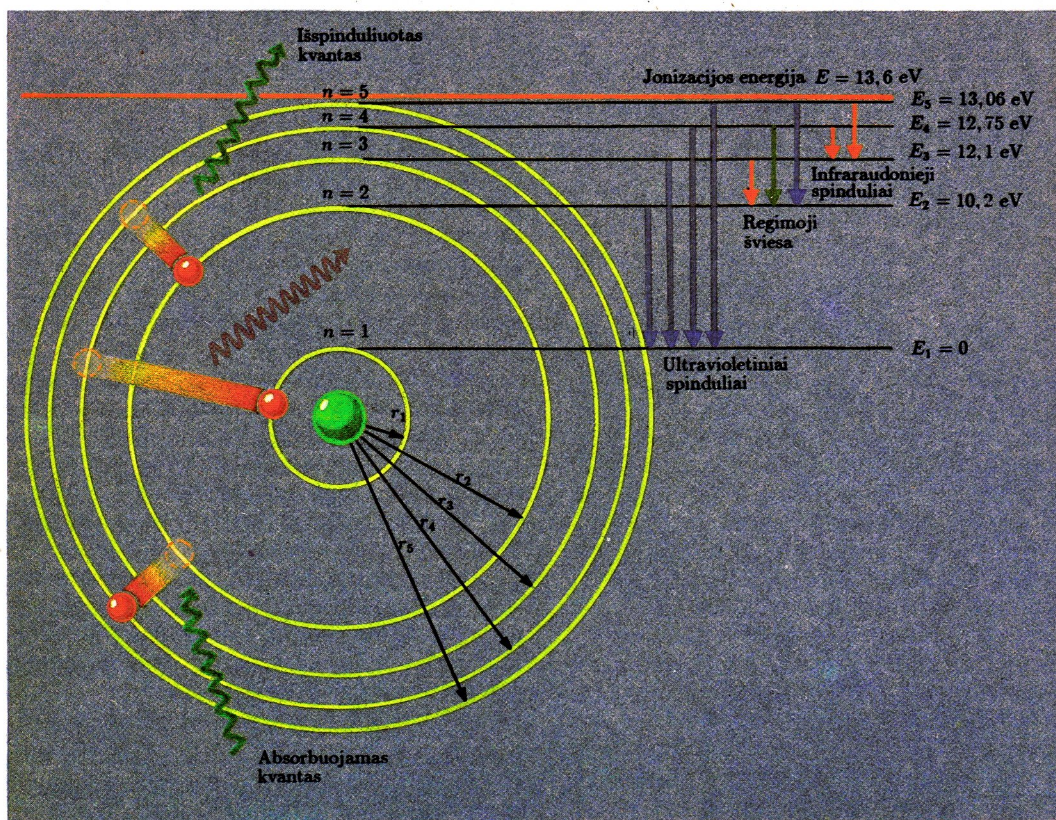
Boro postulatai

Išeitį iš susidariusios keblios padėties pasiūlė danų fizikas Nilsas B o r a s (1885—1962). Pritaikęs Rezerfordo modeliui kvantavimo idėją, 1913 m. jis sukūrė naują atomo teoriją. Boro teorijos esmę sudaro du postulatai:

1. (Stacionarių būsenų sąlyga.) *Elektronai gali skrieti apie atomo branduolį tik tam tikromis — stacionariomis — orbitomis.* Kiekvieną stacionarią orbitą atitinka tam tikra atomo energijos vertė. Šias vertes priimta vadinti atomo **energijos lygmenimis** (58.3 pav.). Vadinasi, galimos tik tam tikros stacionarios atomo būsenos.

Stacionarios būsenos atomai nespinduliuoja energijos.

2. (Dažnių sąlyga.) *Elektronui peršo-*



58.3 pav.



Nilsas Boras (1885—1962)

kant iš vienos stacionarios orbitos į kitą, kitaip sakant, atomui pereinant iš energijos E_m būsenos į mažesnės energijos E_n būseną, išspinduliuojamas energijos kvantas (fotonas). Kvanto energija lygi energijos verčių, atitinkančių tas būsenas, skirtumui:

$$h\nu = E_m - E_n. \qquad (58.1)$$

Išspinduliuotų bangų dažnis

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{\Delta E}{h}. \qquad (58.2)$$

Prisiminus bangos ilgio ir dažnio ryšį $\lambda = c/\nu$, galima nustatyti ir spinduliuojamos bangos ilgį:

$$\lambda = \frac{ch}{\Delta E}. \qquad (58.3)$$

Atomui absorbavus tokio pat didumo energijos kvantą, įvyksta atvirkščias procesas — elektronas pereina orbitą, atitinkančią didesnę atomo energiją. 58.3 paveiksle pavaizduoti elektronų šuoliai iš vienų orbitų į kitas. Patogu atomo būsenos kitimus vaizduoti energijos lygmenų diagramoje, kaip parodyta tame pačiame paveiksle. Turint omenyje šią diagramą, dažnai sakoma „atomas perėjo iš būsenos E_m į būseną E_n“, užuot sakius „elektronas peršoko į kitą orbitą, ir dėl to atomo energija pakito nuo E_m iki E_n“.

Remiantis Boro postulatais, lengva paaiškinti, kodėl įvairių elementų linijiniai spektrai skirtingi: skirtingai išsidėstę jų atomų energijos lygmenys.

Boro teorija išvedė atomo fiziką iš aklavietės ir nurodė tolesnės jos raidos gaires.

Uš nuopelnus tiriant atomo struktūrą ir spinduliavimą Nilsas Boras 1922 m. buvo apdovanotas Nobelio premija.

? *1. Šiuo metu visame pasaulyje yra gauta apie 1 kg gryno radžio. Kiek tam prireikė perdirbti radioaktyvios rūdos?*
2. Kodėl α dalelių pluoštas nukrypsta elektriniame lauke mažiau negu β dalelių pluoštas (58.1 pav.)?
3. Kodėl sulėtėja α dalelė, pereidama per auksinę foliją?

---

59 paskaita

TELEGRAMA NEŽEMIŠKOSIOMS CIVILIZACIJOMS

§ 59.1. Kaip atomai spinduliuoja ir absorbuoja energiją

Boro teorija paaiškino atomų stabilumą ir linijinius atominius spektrus. Remdamasis savo teorija Boras nustatė paprasčiau-

sio — vandenilio — atomo stacionarių orbitų spindulius, taręs, kad jos yra apskritimai. Kartu jis apskaičiavo kiekvieną orbitą atitinkantį atomo energijos lygmenį. Sudėtingesniems kitų elementų atomams, taip pat ir vandenilio atomo kitoms savybėms aprašyti reikėjo sudėtingesnių kvantinės mechanikos lygčių, kurios buvo sudarytos vėliau.

Nuostabi orbitų tvarka

Boras apskaičiavo, kad pirmos stacionarios vandenilio atomo orbitos spindulys yra $0{,}528 \cdot 10^{-10}$ m, o visų tolimesnių orbitų spindulius sieja paprasta formulė

$$r_n = r_1 n^2; \qquad (59.1)$$

čia n — orbitos numeris.

Vadinasi, orbitų spinduliai kinta šitaip:

$r_1:r_2:r_3:r_4:r_5 = 1^2:2^2:3^2:4^2:5^2$, arba

$r_1:r_2:r_3:r_4:r_5 = 1:4:9:16:25...$

Taigi *vandenilio atome elektronas gali judėti tik tokiomis orbitomis, kurių spindulių santykiai lygūs natūrinių skaičių kvadratams.*

H atomo energijos lygmenys

Nuo orbitos, kuria skrieja elektronas, priklauso jo energijos, o kartu ir viso atomo energijos vertė — energijos lygmuo.

Boras apskaičiavo, kad vandenilio atomo energijos lygmenys išreiškiami labai paprasta formule

$$E_n = E_{jon} - \frac{E_{jon}}{n^2}; \qquad (59.2)$$

čia n — elektrono orbitos numeris (kartu ir energijos lygmens numeris), o E_{jon} — jonizacijos energija, vandenilio atomui lygi 13,6 eV.

Pagal šią formulę apskaičiuotos vandenilio atomo energijos vertės (58.3 pav.) labai tiksliai sutapo su išmatuotomis eksperimentiškai.

Kuo didesnė n vertė, tuo toliau nuo branduolio skrieja elektronas ir tuo didesnė jo energija, mažiau ji skiriasi nuo jonizacijos energijos E_{jon}, kurią įgijęs elektronas gali palikti atomą ir judėti laisvai.

Mažiausią energiją elektronas turi judėdamas pirmąja, artimiausia branduoliui, orbita. Sakoma, kad tai yra atomo **pagrindinė būsena.** Kadangi pagrindinė būsena atitinka mažiausią galimą atomo energijos vertę — žemiausią lygmenį,— tai atomas gali likti šios būsenos neribotai ilgai.

Elektronas peršoka į tolimesnę orbitą, kitaip sakant, atomas pereina į aukštesnį energijos lygmenį tik tada, kai absorbuoja tam tikrą energijos kiekį. Toks atomas vadinamas **sužadintu.** Atomą galima sužadinti keliant kūno temperatūrą, apšaudant elektronais ir bet kuriuo kitu būdu suteikiant energijos.

Viską lemia elektronų šuoliai

Sužadinto atomo būsena nestabili. Ji išlieka maždaug 10^{-8} s (bet ir per šitokį laiką elektronas spėja apskrieti apie branduolį maždaug šimtą milijonų kartų!). Po šio laiko atomas išspinduliuoja energijos perteklių ir grįžta į pagrindinę būseną. Į šią būseną gali būti sugrįžtama „šokinėjant“ iš vieno energijos lygmens į kitą — išspinduliuojant keletą fotonų, arba tiesiog „vienu šuoliu“ į pagrindinį lygmenį — išspinduliuojant didesnės energijos (ultravioletinių spindulių) fotoną (58.3 pav.).

Vandenilio spektro linijų serijos

Visi spinduliai, kuriuos vandenilio atomai spinduliuoja pereidami iš aukštesnių lygmenų į tą patį žemesnį lygmenį, sudaro **spektro linijų seriją.**

58.3 paveiksle matome tris „giminingų fotonų“ serijas: viena jų yra ultravioletinių spindulių srityje (**Laimano serija**), kita — regimųjų spindulių (**Balmerio serija**) ir trečia — infraraudonųjų spindulių srityje

(**Pašeno serija**). Yra jų vandenilio spektre ir daugiau.

Vilniuje, Mokslų Akademijos Fizikos institute, vadovaujant akademikui Adolfui Juciui (1904—1974) buvo sukurti nauji tikimybiniai atomų kvantinių šuolių skaičiavimo metodai. Gauta naujų teorinių duomenų apie sudėtingų optinių spektrų struktūrą.

Laiškas nežinomam adresatui

Iš kosminės stoties „Pioner-10", 1972 m. kovo 3 d. startavusios link Jupiterio, buvo pasiųstas pranešimas apie mūsų civilizaciją nežinomoms kosmoso civilizacijoms. Aliuminio plokštelėje buvo išgraviruoti vyro ir moters siluetai ir vandenilio atomo schema — svarbiausia, ką, Žemės mokslininkų nuomone, sugebėtų perskaityti kosmoso broliai.

Atominis sekundės etalonas

Atomo spinduliuojamų dažnių stabilumas leido įvesti naujus kur kas tikslesnius sekundės ir metro etalonus: tarptautiniu susitarimu *sekundės etalonu priimtas laikas, lygus cezio-133 tam tikro dažnio spinduliavimo 9 192 631 770 periodų trukmei.*

Oranžinis metro etalonas

Metro etalonu priimtas ilgis, lygus kriptono-86 spinduliuojamos oranžinės spektro linijos 1 650 736,73 bangos ilgiams.

▲ **59.1.** Kokio dažnio spindulius skleidžia vandenilio atomai, elektronams pereinant iš antrosios orbitos į pirmąją?

△ **59.2.** Kokio bangos ilgio spindulius skleidžia vandenilio atomai, pereidami iš jonizuotos būsenos į normalią?

---

§ 59.2. Lazerio spinduliavimas

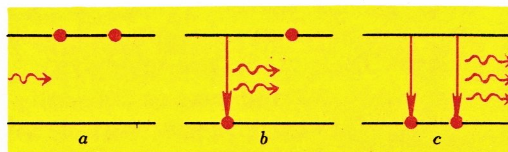
Šimtas lazerio profesijų

Jau anksčiau, kalbėdami apie holografiją (§ 51.4), esame minėję koherentinių šviesos bangų šaltinį *lazerį*. Gimęs vos prieš dešimtmečius paslaptingasis lazeris netruko sukelti revoliuciją daugelyje technikos sričių, įgyti šimtus profesijų moksle, pramonėje, medicinoje, žemės ūkyje ir kitur. Galingų technologinių lazerių spinduliais pjaustomi, gręžiami, grūdinami, suvirinami ir graviruojami metalai, sukeliamos be jo nevykstančios cheminės reakcijos, gaunamos labai grynos medžiagos ir auginami kristalai. Lazerio spindulys naudojamas ryšiams ir šviesos lokacijai. Juo lituojamos smulkiausios mikroschemos, atliekamos mikrochirurginės (pavyzdžiui, akių tinklainės) operacijos. Lazeris būtinas gauti erdviniam daikto atvaizdui — hologramai. Šiandien vargu ar įmanoma išvardyti visas sritis, kur pritaikomos nuostabios lazerio savybės, o dar sunkiau numatyti naujas lazerių profesijas kad ir artimiausioje ateityje. Todėl lazerių gamyba jau tapo viena svarbiausių pramonės šakų.

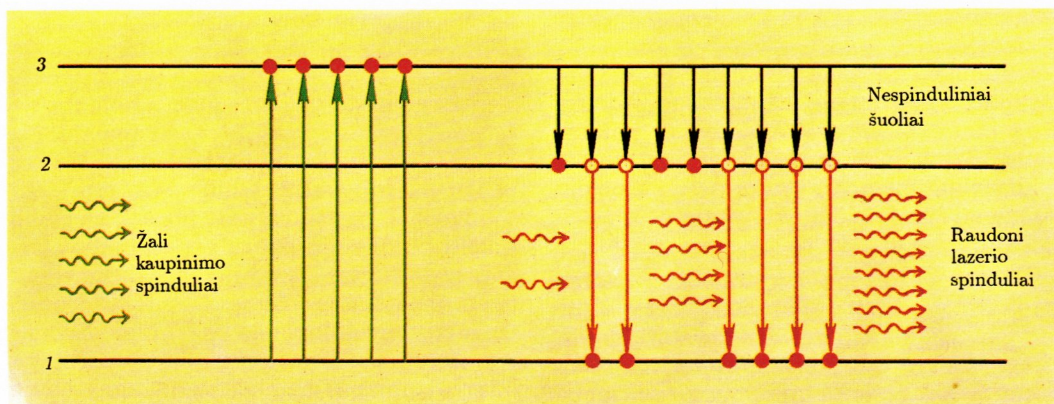
Tad kaip gi veikia lazeris ir kuo ypatingas jo spinduliavimas?

Dvejopas spinduliavimas

Paprastai sužadinti atomai greitai savaime grįžta į nesužadintą būseną išspinduliuodami fotonus. Vykstant **savaiminiam spinduliavimui**, fotonai būna įvairaus dažnio,



59.1 pav.



59.2 pav.

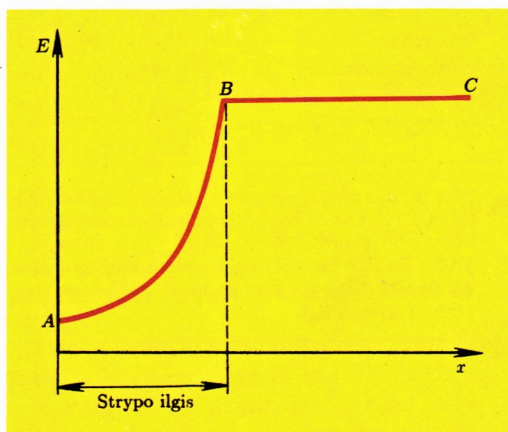
nesuderintų fazių, jie sklinda visomis kryptimis. Taip padrikai spinduliuoja visi įprastiniai šviesos šaltiniai.

Tačiau kai kuriais atvejais sužadinti atomai tokie ir lieka — „neatsikrato“ energijos pertekliaus — gana ilgai, jeigu jų nepriverčia tai padaryti išorinis poveikis. Toks „katalizatorius“ yra išoriniai spinduliai, kurių fotonai — tokie pat, kokius turi spinduliuoti sužadintasis atomas, grįždamas į nesužadintą būseną. Šiuo atveju atomai ne sugeria išorinio spinduliavimo fotonus, o, atvirkščiai, patys išspinduliuoja tokio pat dažnio, fazės ir krypties fotonus. Vietoj vieno išorinio fotono atsiranda du tokie pat fotonai, jie sutinka kitus sužadintus atomus, ir fotonų skaičius didėja tarsi sniego griūtis kalnuose (59.1 pav., *a, b, c*). Toks spinduliavimas vadinamas **indukuotuoju.** Jį dar 1917 m. buvo teoriškai numatęs A. Einšteinas.

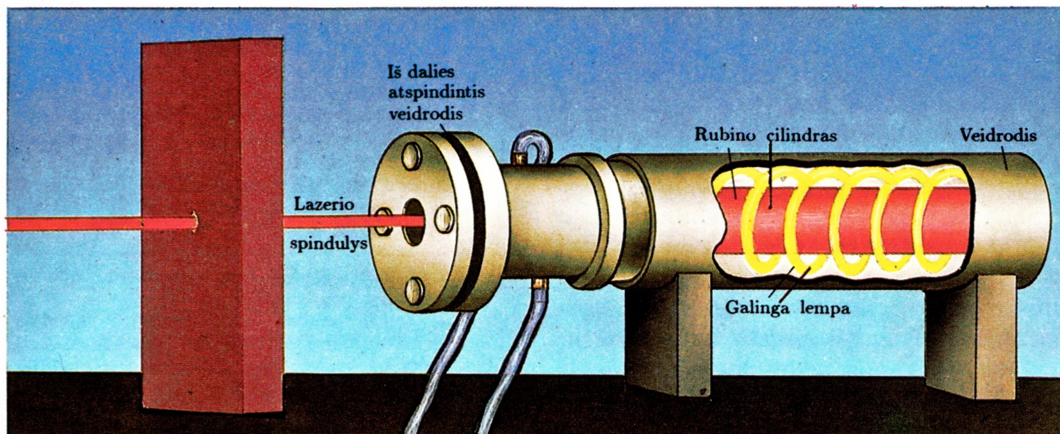
Taip galima sukurti galingą šviesos srautą, kuris, būdamas koherentinis, beveik nesisklaido. Tai ir yra lazerio spindulys.

Indukuotojo spinduliavimo mechanizmas

Indukuotasis spinduliavimas gali vykti tik kai kuriose medžiagose, kurių atomams būdingas tam tikras energijos lygmenų išsidėstymas — trijų energijos lygmenų sistema (59.2 pav.). Taip išsidėstę, pavyzdžiui, chromo atomų, įsiterpusių rubino kristale, energijos lygmenys. Apšvietus rubino strypą stiprios impulsinės lempos žybsniu, chromo atomai absorbuoja žalių spindulių kvantus ir peršoka iš pirmojo lygmens į trečiąjį, o iš jo savaime peršoka į antrąjį lygmenį ne išspinduliuodami energijos perteklių, o per-



59.3 pav.



59.4 pav.

duodami kristalui (jis virsta atomų virpesių energija). Antrajame lygmenyje atomas gali būti palyginti ilgą laiką. Tokiu būdu didėja sužadintų iki antrojo lygmens atomų skaičius, jų gali pasidaryti daugiau negu nesužadintų atomų. Šis procesas vadinamas **kaupinimu.** Taip susidaro energijos rezervas lazerio spinduliui. Atomui grįžtant iš antrojo į pirmąjį stacionarų lygmenį, išspinduliuojamas raudonos šviesos fotonas. Atsitiktinis kristale atsiradęs šio dažnio fotonas, jei tik jis skries kristalu pakankamai ilgą kelią (judės išilgai rubino strypo), indukuos fotonų griūtį. Spindulio energija didės priklausomai nuo strypo ilgio, kaip parodyta 59.3 paveiksle.

Rubininio lazerio konstrukcija

Lazerio pavadinimas sudarytas iš angliško sakinio "light amplification by stimulated emission of radiation" (šviesos stiprinimas indukuotuoju spinduliavimu) pirmųjų raidžių. Galima sakyti, kad lazeris gimė tada, kai buvo sumanyta rubino strypą įdėti į rezonatorių, kuris daug kartų pailgina spindulio kelią strype. Rezonatoriaus konstrukcija labai paprasta: 1—2 cm skersmens ir 5—30 cm ilgio rubino strypo galai lygiagrečiai nušlifuojami ir padengiami sidabro sluoksniu: viename gale — veidrodiniu, o kitame — iš dalies skaidriu. Išilgai strypo ašies sklindantis šviesos pluoštas daug kartų atsispindi nuo strypo galų ir greitai stiprėja, kol pro pusiau skaidrų veidrodį išsiveržia galingas lazerio spinduliavimo impulsas (59.4 pav.).

Rubininis lazeris veikia impulsiniu režimu. Yra ir nenutrūkstamai spinduliuojančių lazerių.

Iš viso spektro, kurį spinduliuoja impulsinė lempa, chromo atomams sužadinti reikalingi tik tam tikro dažnio žali spinduliai (59.2 pav.). Kiti absorbuoti spinduliai tik šildo kristalą, todėl jis aušinamas. Tokio lazerio naudingumo koeficientas ne didesnis kaip 1%.

Rubininį lazerį 1960 m. išrado amerikiečių fizikas T. Melmanas. Už lazerių teorijos sukūrimą JAV fizikas Čarlis Taunsas ir rusų fizikai Nikolajus Basovas ir Aleksandras Prochorovas 1964 m. apdovanoti Nobelio premija.

Lazerių tyrimo centras Lietuvoje

Lazerių fizikos srityje sėkmingai dirba Lietuvos mokslininkai. Vilnius yra žymus šios jaunos mokslo šakos centras. Fizikos institute, vadovaujant akademikui J. Viščakui, buvo sukurti pikosekundiniai lazeriai, padedantys spręsti daug naujų mokslo ir praktikos problemų. Kitas mokslinis lazerių tyrimo centras, veikiantis Vilniaus universitete ir vadovaujamas prof. Algio Piskarsko, sėkmingai taiko lazerių fizikos pasiekimus technologijoje, chemijoje, biologijoje ir medicinoje.

?

1. Kiek energijos turi 58.3 paveiksle pavaizduoti spinduliuojami fotonai? Kokie tai spinduliai?
2. Kuri vandenilio spektro linijų serija atvaizduota 54.3 paveiksle, d?
3. Remdamiesi 58.3 paveiksle pateikta informacija, paaiškinkite 54.3 paveiksle, d, spektro linijų susidarymą.
4. Rubino strypo ilgis lazeryje parenkamas toks, kad jame tilptų sveikasis spinduliuojamų bangų skaičius. Kodėl?


59.3. Kokią energiją turi elektronas, judantis vandenilio atome trečiąja orbita?


59.4. Kokio bangos ilgio spindulius skleidžia vandenilio atomai, elektronams pereinant iš ketvirtosios orbitos į antrąją? Kokia tų spindulių spalva?

5 dalis
RELIATYVUMO TEORIJA

5.1 skyrius
RELIATYVUMO TEORIJOS PAGRINDAI

Kartą Einšteino paklausė, kaip, jo nuomone, atsiranda naujos teorijos.
— Labai paprastai,— atsakė mokslininkas.— Visi žino, kad tai neįmanoma, bet štai atsiranda vienas nevykėlis, kuris šito nesupranta. Jis ir sukuria naują teoriją.

60 paskaita
TAIP PRASIDĖJO RELIATYVUMO TEORIJA

§ 60.1. Galilėjaus reliatyvumo principas

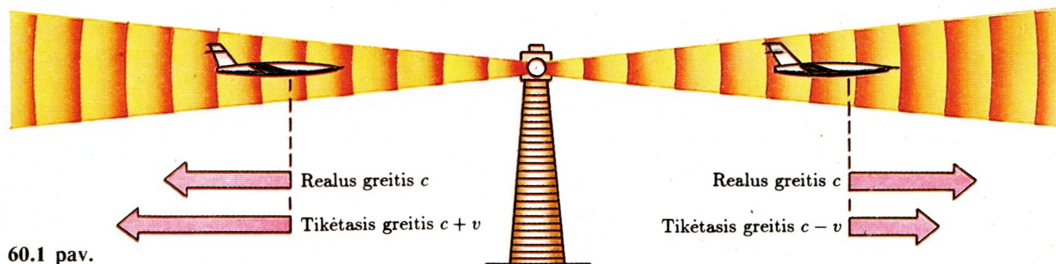
Mechanikos kurse buvo įrodyta, kad kūno padėtis erdvėje, jo judėjimas ir greitis yra *reliatyvūs*. Tai reiškia, kad jie priklauso nuo stebėtojo padėties ir nuo atskaitos sistemos. Taip pat buvo patikslinta, kad mums žinomi mechanikos dėsniai yra teisingi tik *inercinėse atskaitos sistemose, t. y. atskaitos sistemose, susietose su tiesiai ir tolygiai judančiu objektu.* Tokiomis sistemomis apsiribos ir čia nagrinėjama reliatyvinė mechanika. Kadangi kalbėsime vien apie inercines sistemas, tai to dažniausiai nė nepabrėšime.

Inercinėms atskaitos sistemoms dar Galilėjus suformulavo **reliatyvumo principą**: *jokiais mechaniniais bandymais neįmanoma nustatyti skirtumo tarp judėjimo iš inercijos ir rimties būsenos.* Vadinasi, visos inercinės atskaitos sistemos yra lygiavertės, neįmanoma rasti kokios nors vienos išskirtinės — absoliučios — sistemos. Tai yra vienas pagrindinių gamtos dėsnių.

§ 60.2. Maikelsono bandymas

Šviesos greičio mįslė

Ramią klasikinės fizikos raidą sutrikdė amerikiečių fiziko Alberto Maikelsono (1852—1931) nepasisekęs bandymas nustatyti Žemės judėjimo įtaką šviesos greičiui. Klasikiniu požiūriu, bet kokiai sistemai judant greičiu v link Saulės arba nuo jos, šviesos greitis joje turėtų būti $c+v$ arba



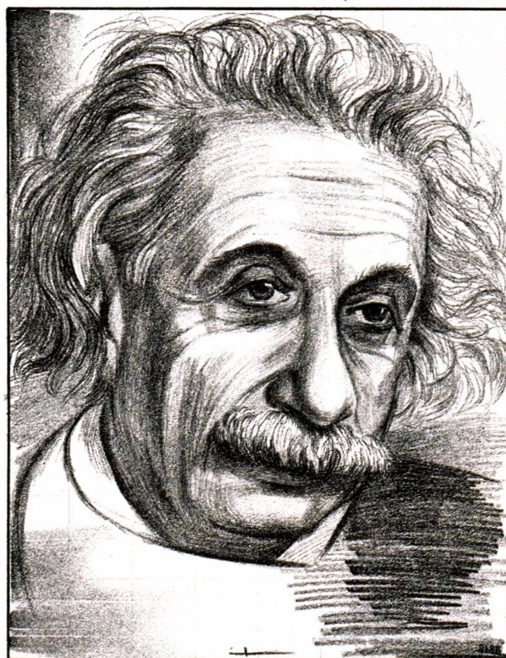
60.1 pav.

$c - v$ (60.1 pav.). Tačiau pasirodė, kad ši akivaizdi taisyklė šviesos spinduliui netinka. Visi greičiai gamtoje reliatyvūs, o šviesos greitis — ne!

Pavyzdžiui, įsivaizduokime, kad lakūnas, skrisdamas 300 m/s greičiu, iššauna iš patrankėlių pirmyn ir atgal sviedinius 500 m/s greičiu. Žemės atžvilgiu sviedinių greitis būtų atitinkamai 800 ir 200 m/s — tai nekelia abejonių. Tačiau jeigu lakūnas pašviestų prožektoriais pirmyn ir atgal, tai žemės atžvilgiu išmatuoti šviesos greičiai būtų vienodi: $c + v = c$; $c - v = c$! Neįtikėtina, o vis dėlto taip yra.

Maikelsonas atliko tokio pobūdžio matavimus, naudodamas labai sudėtingą ir tikslią aparatūrą, ir neaptiko jokio šviesos greičio pasikeitimo, nors jo bandyme prie šviesos greičio turėjo būti pridėtas arba atimtas nemažas Žemės judėjimo orbita aplink Saulę greitis — 30 km/s.

Vieni mokslininkai nepasitikėjo eksperimentu, kiti suabejojo reliatyvumo principu, treti sunerimę skėsčiojo rankomis. Garsus olandų fizikas Hendrikas Lorencas pareiškė apgailestaująs, kad sulaukė to laiko...



Albertas Einšteinas (1879—1955)

§ 60.3. Einšteino postulatai*

Nepavykusio bandymo triumfas

1905 m. Albertas E i n š t e i n a s ryžosi eksperimentą, griaunantį darnią klasikinės fizikos sistemą, imti naujos teorijos pamatu. Jis pareiškė drąsią mintį, kad iš tikrųjų *šviesos greitis vakuume yra vienodas visomis kryptimis ir nepriklauso nei nuo šaltinio, nei nuo stebėtojo judėjimo greičio.* Šviesos greitis vakuume $c = 299\ 792$ km/s ($\sim 300\ 000$ km/s $= 3 \cdot 10^8$ m/s) — absoliutus, jo negalima nei padidinti, nei sumažinti. Tai **pirmasis Einšteino postulatas.**

Bendresnis reliatyvumo principas

Antruoju postulatu Einšteinas priėmė Galilėjaus reliatyvumo principą (§ 60.1), jį išplėsdamas ne tik mechaniniams, bet ir kitokiems gamtos procesams: *jokiais bandymais (sistemos viduje) negalima nustatyti skirtumo tarp judėjimo iš inercijos ir rimties būsenos.* Tai reiškė, jog beprasmiški kai kurių to meto fizikų lūkesčiai kada nors, kokiu nors sudėtingu bandymu, pasitelkus šviesą ar kitas elektromagnetines bangas, atskirti tolygų judėjimą nuo rimties būsenos.

* Labiau įsigilinus į fizikos istoriją, reliatyvumo teorijos kūrėjais derėtų laikyti tris fizikos milžinus: olandų fiziką Hendriką Lorencą, prancūzų fiziką ir matematiką Anri Puankarė ir Albertą Einšteiną.

Ką tiria reliatyvumo teorija

Remdamasis šiais dviem postulatais, Einšteinas sukūrė fizikos teoriją, nagrinėjančią reiškinius, kuriuos lemia šviesos greičio baigtinė ir pastovi vertė. Šie reiškiniai yra tuo ryškesni, kuo didesni kūnų greičiai. *Fizikos teorija, nagrinėjanti reiškinius, vykstančius dideliais greičiais judančiose sistemose, vadinama* **reliatyvumo teorija.** Ši teorija padeda suvokti, kaip atrodo pasaulis skrendant per jį šviesai artimais (reliatyvistiniais) greičiais.

Už reliatyvumo teorijos sukūrimą Albertui Einšteinui 1921 m. paskirta Nobelio premija.

Dvi neperžengiamos ribos

Remiantis Einšteino postulatais įrodoma, kad joks materialus kūnas negali judėti greičiu, lygiu šviesos greičiui arba dar didesniu. Šviesos greičio, kaip ir absoliutinio temperatūros nulio, pasiekti neįmanoma.

§ 60.4. Vienalaikiškumo reliatyvumas

Einšteino postulatai palietė pačius klasikinės Niutono mechanikos pamatus — jie vertė iš esmės keisti įsigalėjusį požiūrį į laiką ir erdvę.

Kuo tikėti?

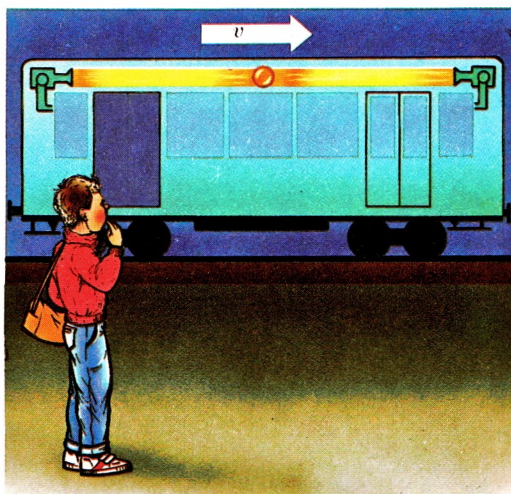
Panagrinėkime reliatyvistiškai šitokį įvykį: visu greičiu riedant ekspresui, staiga viename vagone automatas pravėrė abejas duris (60.2 pav.). Kaip šį įvykį matė ir atpasakojo vagono keleivis ir pakelėje stovėjęs praeivis?

Vagono keleivis tvirtino, kad priekinės ir užpakalinės durys prasivėrė vienu metu. *Taip ir turėjo būti,* nes ekspreso duris atidaro automatai, kai į jų fotoreles (§ 56.3) ateina šviesos signalai, o juos siunčiantis šviesos šaltinis yra vagono viduryje, taigi vienodai nutolęs nuo abiejų fotorelių. Kadangi atstumai, kuriuos turi nueiti signalai, yra vienodi, o šviesos greitis nepriklauso nuo ekspreso judėjimo, tai durys tiek važiuojant, tiek stovint atsidaro vienu metu.

Tačiau įvykį stebėjęs praeivis teigia, kad užpakalinės durys atsivėrė anksčiau negu priekinės. *Taip ir turėjo būti,* nes šviesos greitis nepriklauso nuo ekspreso judėjimo, o užpakalinės durys juda priešais signalą — šviesai reikia įveikti trumpesnį nei pusės vagono ilgis kelią, gi priekinės durys bėga nuo signalo — to signalo kelias pailgėja.

Paradoksais reikia tikėti

Taigi įvykiai, vienalaikiai vieniems stebėtojams, pasirodė esą nevienalaikiai kitiems. Tai, regis, prieštarauja „sveikam protui“, bet *taip iš tikrųjų yra.* Tokia yra Gamtos tiesa, kurią lemia šviesos (elektromagnetinių bangų) greičio pastovumas. Mes, pavyzdžiui, jau nesistebime, kad tokios są-



60.2 pav.

vokos, kaip „vidudienis“ arba „viršus“ paaiškėjo esą reliatyvios, priklausančios nuo geografinės padėties. Tenka priprasti, kad *vienalaikiškumo sąvoka taip pat yra reliatyvi*. Sakyti, kad du įvykiai skirtingose vietose įvyksta vienu metu, yra beprasmiška, jeigu kartu nenurodoma, kokioje atskaitos sistemoje matuojamas laikas. Tai viena svarbiausių Einšteino teorijos išvadų.

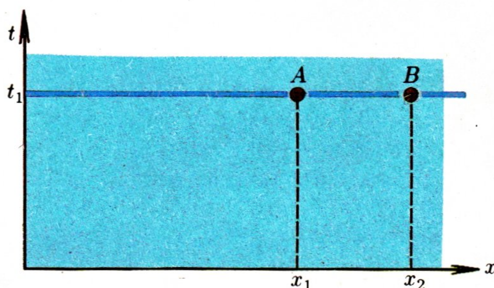
Ar galima kelionė į ateitį?

Vienalaikiškumo reliatyvumas nepažeidžia **priežastingumo principo.** Kad ir kokiu greičiu judėtų stebėtojas, jis niekados neužfiksuos įvykių atvirkščia tvarka. Niekados nušautas zuikis nekris pirma, negu medžiotojas paspaus gaiduką.

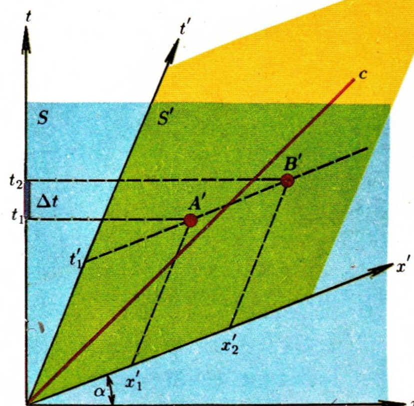
Belieka pridurti, kad jeigu mes gyventume didelių greičių pasaulyje, tai reliatyvumo teorijos teiginiai būtų natūralūs ir lengvai suvokiami.

Nestačiakampės koordinatės

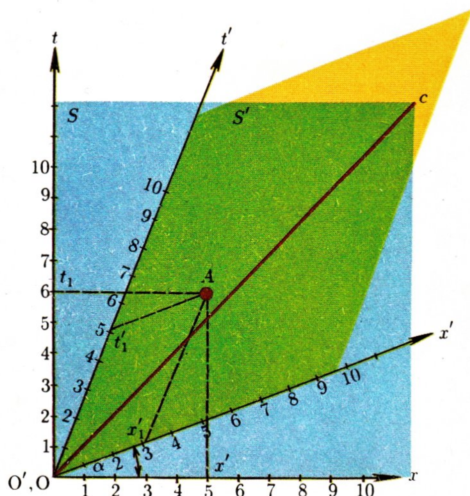
Kai kuriuos reliatyvumo teorijos teiginius galime pailiustruoti grafiškai.



60.4 pav.



60.5 pav.



60.3 pav.

Pradėkime nuo klasikinės fizikos. Sakykime, fizikinis įvykis (pvz., šviesos blyksnis) gali įvykti kuriame nors tiesės, sutampančios su x ašimi, taške. Antrąja stačiakampių koordinačių ašimi pasirinkus laiką t, taškas $A(x, t)$ toje koordinačių sistemoje žymės įvykį, įvykusį vietoje x momentu t nejudančioje (klasikinėje) atskaitos sistemoje.

Norėdami pereiti prie judančios reliatyvistiniu greičiu atskaitos sistemos, laiko ir ilgio mastelius stačiakampėje koordinačių sistemoje pasirinkime tokius, kad šviesos greitį c vaizduojanti tiesė būtų pusiaukampinė. 60.3 paveiksle tai sistema S $(x; t)$. Nesunku įrodyti matematiškai: analogišką judančią koordinačių sistemą, kad šviesos

greitis liktų nepasikeitęs, turime braižyti ne stačiakampę, o priartindami jos ašis prie pusiaukampinės c (sistema $S'(x'; t')$). Atskaitos pradžia abiejose sistemose sutampa. Posvyrio kampas α priklauso nuo sistemos S' greičio ir vadinamas **aberacijos kampu.**

Pavyzdžiui, Žemės, judančios 30 km/s greičiu, aberacijos kampas, stebint nejudančias žvaigždes, lygus tik 22″.

Taškas A žymi fizikinį įvykį, apibūdinamą laiko ir vietos koordinatėmis. Brėžinyje matome, kad įvykio A vietos ir laiko koordinatės yra reliatyvios — nejudančios (S) ir judančios (S') sistemų atžvilgiu jis įvyko skirtingu laiku ir skirtingose vietose: šiuo atveju $A(5; 6)$, o $A'(3, 2; 5)$.

60.4 paveiksle atvaizduoti du vienalaikiai įvykiai A ir B, įvykę taškuose x_1 ir x_2 laiko momentu t_1 nejudančioje atskaitos sistemoje, o 60.5 paveiksle — vienalaikiai įvykiai A' ir B', įvykę taškuose x_1' ir x_2' laiko momentu t_1' judančioje atskaitos sistemoje. Kaip matome pastarajame brėžinyje, šie įvykiai nėra vienalaikiai nejudančios sistemos atžvilgiu: įvykis A' joje įvyksta anksčiau negu įvykis B'. Laiko skirtumas $t_2 - t_1 = \Delta t$ tuo didesnis, kuo didesniu greičiu juda sistemos viena kitos atžvilgiu. O kai šis greitis lygus nuliui, tai ir aberacijos kampas $\alpha = 0$; tada reliatyvistinės ir klasikinės mechanikos išvados sutampa.

61 paskaita

REPORTAŽAI IŠ KOSMODROMO

Kartą, kai A. Einšteinas perskaitė paskaitą apie reliatyvumo teoriją, vienas studentų pasakė:

— Visu tuo aš netikiu. Sveikam protui egzistuoja tik tai, ką galima pamatyti.

— Jūsų argumentas skamba įtikinamai,— atsakė žymusis fizikas.— Prašom padėti ant stalo savo sveiką protą. Tada aš patikėsiu, kad jį turite.

§ 61.1. Laiko reliatyvumas

Skubant ir laikas sulėtėja

Kadangi vienalaikiškumas yra reliatyvi sąvoka (§ 60.4), tai reliatyvus turi būti ir pats laikas, jo bėgsmas, laikotarpio tarp tų pačių įvykių trukmė. Štai, pavyzdyje apie ekspresą nuo šviesos signalo pasiuntimo iki priekinių durų atsidarymo pagal keleivio laikrodį praėjo vienoks laiko tarpas, o pagal praeivio laikrodį — kitoks. Atsakyti į klausimą, kokioje atskaitos sistemoje laikas teka greičiau, padeda 60.3 paveikslas: nuo laiko atskaitos pradžios iki įvykio A trumpesnis laiko tarpas praslinko judančioje sistemoje.

Reliatyvumo teorijoje įrodoma (pastaruoju metu tai ir patvirtinta eksperimentais), kad *judančioje sistemoje laikas slenka lėčiau.* Judančio laikrodžio sekundė ilgesnė, jis vėluoja nejudančio laikrodžio atžvilgiu. Šis *laiko sulėtėjimo* judančioje sistemoje reiškinys tuo ryškesnis, kuo didesnis, kuo artimesnis šviesos greičiui jos judėjimo greitis. Dideliu greičiu judančioje sistemoje sulėtėjus laikui, sulėtėja ir visi procesai — fiziniai, cheminiai, biologiniai. Nejudančio stebėtojo atžvilgiu viskas vyksta tarsi sulėtintame filme. *Nejudančioje sistemoje laikas slenka greičiausiai.*

Savieji ir reliatyvieji parametrai

Su judančiu kūnu susieta atskaitos sistema vadinama **savąja atskaitos sistema** (S_0). Laikas ir kiti parametrai, išmatuoti savojoje (kartu judančioje) sistemoje, vadinami **savaisiais parametrais.** Be **savojo laiko** t_0, matuojamo laikrodžiu, judančiu kartu su objektu, kalbėsime ir apie **savąjį ilgį** l_0, matuojamą nejudančiu objekto atžvilgiu matavimo prietaisu, **savąją,** arba **rimties masę,** m_0 ir kt.

Matuojant tuos pačius kūnų parametrus netiesioginiais metodais iš kitos atskaitos sistemos, pavyzdžiui, iš Žemės, jie kinta

priklausomai nuo sistemų reliatyvaus judėjimo greičio. Taigi šie fizikiniai kūno parametrai yra *reliatyvūs dydžiai*.

Tiltas tarp Niutono ir Einšteino fizikos

Kiekybinį ryšį tarp savojo laiko tarpo t_0 ir laiko tarpo t, išmatuoto tarp tų pačių įvykių nejudančioje sistemoje, išreiškia **Lorenco formulė**

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \qquad (61.1)$$

čia v — judančios sistemos greitis, o c — šviesos greitis. Vadinasi, to paties laikotarpio trukmė gali kisti, žiūrint koks greitis atskaitos sistemos atžvilgiu, nuo neapibrėžtai didelių verčių, kai greitis v artėja prie šviesos greičio c, iki vertės $t = t_0$, kai v nepalyginamai mažesnis už c ($v/c \approx 0$). Pastaruoju atveju galioja Niutono mechanikos dėsniai, todėl kasdieniniame gyvenime praktiškai neįmanoma pastebėti reliatyvistinio laiko sulėtėjimo.

Pavyzdys. Raketa Žemės atžvilgiu juda 240 000 km/h, t. y. 0,8 c greičiu. Pagal kosmonauto laikrodį, raketoje praėjo 100 s. Kokį laikotarpį tarp tų pačių įvykių nustatė Žemės stebėtojas? Išspręskime tokį pat uždavinį apie lėktuvą, skrendantį 300 m/s greičiu.

S p r e n d i m a s. 1. Reliatyvų laikotarpį t, kuris praėjo tarp tų pačių įvykių raketoje ir lėktuve pagal Žemės stebėtojo laikrodį, apskaičiuosime pagal Lorenco formulę

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

2. Sąlygos duomenys:

$t_0 = 100$ s (abiem atvejais)
raketos greitis $v_r = 0,8\ c$,
lėktuvo greitis $v_l = 300$ m/s.

3. Įrašę apskaičiuojame:

$$t_r = \frac{100}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2}} = \frac{100}{\sqrt{0,36}} = 166,6 \text{ (s)};$$

$$t_l = \frac{100}{\sqrt{1 - \left(\frac{3 \cdot 10^2}{3 \cdot 10^8}\right)^2}} = \frac{100}{\sqrt{1 - 10^{-12}}} = 100 \text{ (s)}.$$

Ats. Žemėje esantis stebėtojas tarp tų pačių įvykių raketoje nustatė 166,6 s, o tarp įvykių lėktuve — 100 s laiko tarpą.

61.1. Dvi raketos juda tolygiai ir tiesiai, jų kursai lygiagretūs, kryptis ta pati, greičiai vienodi ir lygūs $v = 0,6\ c$ Žemės atžvilgiu. Pirmoje raketoje įvyksta du nuoseklūs įvykiai, tarp kurių laiko intervalas $t_0 = 8$ h. Kokį laiko intervalą tarp tų įvykių parodė antroje raketoje esančio stebėtojo laikrodis ir Žemėje esančio stebėtojo laikrodis?

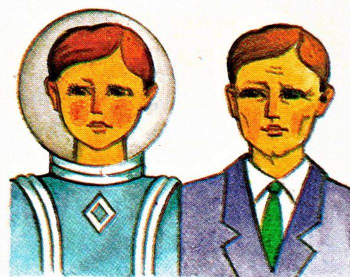
Ar išsprendžiamas „dvynių paradoksas"?

Iš visų reliatyvumo teorijos išvadų bene daugiausiai diskusijų yra sukėlęs vadinamasis *dvynių paradoksas*. Tai — mintinis eksperimentas su broliais dvyniais.

Dvyniai patikrina laikrodžius, ir vienas iš jų išskrenda ilgalaikėn kelionėn į kosmosą (61.1 pav., *a*). Keleiviui sugrįžus vėl



a



b

61.1 pav.

patikrinami laikrodžiai, ir paaiškėja, kad kosmonauto laikrodis atsilikęs. Taip ir turi būti, nes, pagal reliatyvumo teoriją, kosminiame laive laikas slenka lėčiau. Beje, laikrodžių galima ir netikrinti: jei kosminis laivas skrenda greičiu, palyginamu su c, tai kosmonautas bus matomai jaunesnis už Žemėje laukusį brolį (61.1 pav., *b*).

Ši išvada pati savaime nėra paradoksali. Paradoksalu tai, kad turėtų būti ir... atvirkščiai! Juk bet koks judėjimas yra reliatyvus, todėl, nenusižengdami logikai, galime Žemę laikyti judančia sistema ir tikėtis, kad jaunesnis bus namie likęs dvynys. Tai ir yra paradoksas — logiškai neprieštaringa, bet sveikam protui nepriimtina situacija.

Aprašytąjį mintinį eksperimentą komplikuoja tai, kad iš tikrųjų dvynių padėtis nėra simetriška, nes tik vieną iš jų veikia pagreitis laivui startuojant ir grįžtant į Žemę. O pagreitis — jau ne reliatyvus dydis. Būtent dėl pagreičio šiuo atveju negali būti taikomos reliatyvistinės mechanikos išvados.

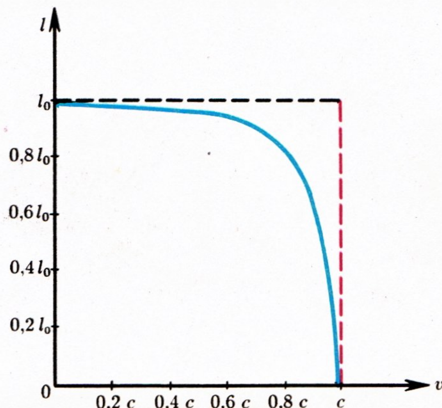

— Kodėl pavėlavai,— klausia uždususio Simo dėstytojas.
— Tur būt, todėl, kad bėgau kiek įkabindamas ir laikas mano sistemoje sulėtėjo...

---

§ 61.2. Ilgio reliatyvumas

Ar visada apvalus sviedinys?

Išmatuoti judančio kūno ilgį — tai reiškia užfiksuoti *vienu metu* atstumą tarp jo galų. Tačiau sąlyga „vienu metu“ yra reliatyvi, priklauso nuo atskaitos sistemos judėjimo. Taigi negali būti absoliutus ir ilgis. Ilgio vertė, gauta matuojant judančioje kartu, t. y. reliatyviai nejudančioje sistemoje (*savasis ilgis*) yra didžiausia. Išmatuotas kitoje sistemoje, pavyzdžiui Žemėje, esančio



61.2 pav.

stebėtojo, tas pats ilgis bus $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ karto mažesnis, t. y.

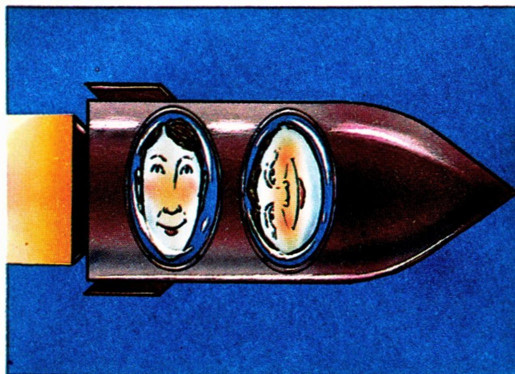
$$l = l_0\sqrt{1 - v^2/c^2}. \qquad (61.2)$$

61.2 paveiksle parodyta, kaip kūnas trumpėja greičiui artėjant prie šviesos greičio.

Pastaroji formulė ir grafikas rodo, kaip kinta atstumai ir kūno matmenys *judėjimo kryptimi*. Statmena greičio vektoriui $\mathbf{v}$ kryptimi atstumai nekinta. Taigi skersiniai kūno matmenys nepriklauso nuo greičio ir visose inercinėse sistemose yra vienodi (61.3 pav.). (61.2) formulė rodo, kad kūno ilgis priklausomai nuo greičio gali kisti nuo savojo ilgio l_0 iki nykstamai mažų verčių, jeigu sistemos greitis priartėja prie šviesos greičio. Kūnų trumpėjimas dar kartą patvirtina teiginį, kad joks realus kūnas negali judėti šviesos greičiu: tokiu atveju ilgis, taigi ir tūris, pasidarytų lygūs nuliui — kūnas išnyktų!

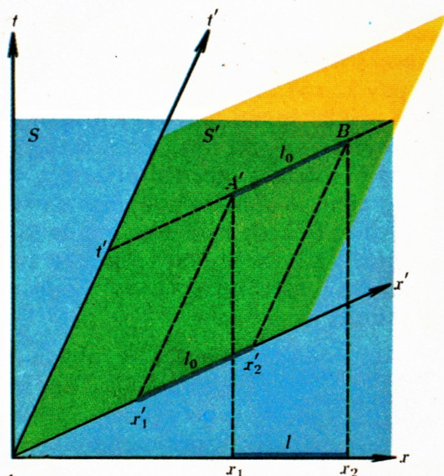
Eksperimentas reliatyvumo teorijos naudai

Gamta — didžiausioji laboratorija — pateikia reliatyvumo teorijos eksperimentinių patvirtinimų. Viršutiniuose atmosferos sluoks-



61.3 pav.

niuose, veikiant kosminiams spinduliams, susidaro elementariosios dalelės μ mezonai. Jos juda artimu šviesai greičiu, dažnai pralekia visą atmosferą ir net giliai įsiskverbia į žemę. Gavus mezonus dirbtinu būdu, paaiškėjo, kad jų gyvavimo trukmė laboratorijoje yra vos $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s. Per tokį laiką, net judėdami šviesos greičiu, jie spėtų nuskrieti tik maždaug 600 m. Tai kaip gi jie pasiekia Žemės paviršių? Atsakyti į šį klausimą padeda reliatyvistinė atstumų su-



61.4 pav.

trumpėjimo formulė (61.2): kuo greičiau juda mezonas, tuo trumpesnis jo sistemoje kelias iki Žemės.

Reliatyvistinės fizikos geometrija

Sutrumpėjimą judančioje sistemoje galima atvaizduoti grafiškai. 61.4 paveiksle sistemoje S' laiku t' išmatuojama atkarpa $A'B'$, lygiagreti ašiai x'. Suprojektavę atkarpą į judančią (x') ir nejudančią (x) ašis, matome, kad savasis ilgis l_0 yra didesnis už ilgį l, išmatuotą nejudančio stebėtojo.

▲ **61.2.** Strypo savasis ilgis 1,0 m. Kokį jo ilgį išmatuos stebėtojas, kurio atžvilgiu strypas juda greičiu $v = 0{,}60\ c$ savo išilginės ašies kryptimi?

---

§ 61.3. Reliatyvistinė greičių sudėties taisyklė

Kad ir kiek pridėsi — daugiau nebus!

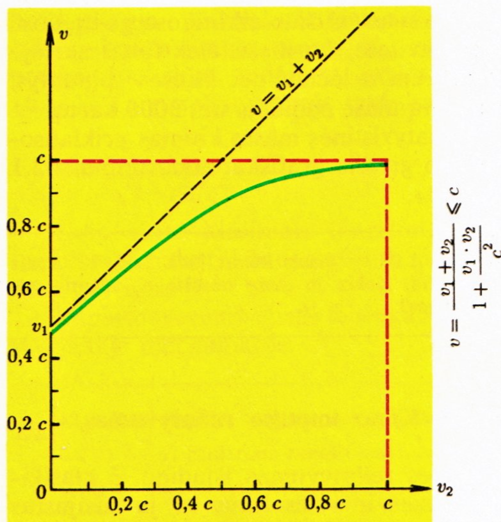
Klasikinėje fizikoje greičiai sudedami naudojantis vektorių lygiagretainiu ir iš jo išplaukiančiomis formulėmis. Reliatyvistinėje fizikoje greičių sudėties taisyklės turi būti tokios, kad niekada greičių suma nebūtų didesnė už šviesos greitį vakuume. A. Einšteinas, remdamasis reliatyvumo teorijos postulatais, išvedė šitokią formulę judančių priešpriešiais kūnų greičiams $\mathbf{v}_1$ ir $\mathbf{v}_2$ sudėti:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}; \qquad (61.3)$$

čia v yra jų suartėjimo (tolimo) greitis.

61.5 paveiksle grafiškai palygintos klasikinė ir reliatyvistinė greičių sudėties taisyklės.

Pavyzdys. Dvi raketos prasilenkia skriedamos vienodais 0,9 c greičiais. Reikia apskaičiuoti



61.5 pav.

jų suartėjimo greitį naudojantis klasikine ir reliatyvistine greičių sudėties formulėmis.

S p r e n d i m a s. 1. Pagal klasikinę mechaniką

$v = v_1 + v_2$; $v = 0{,}9c + 0{,}9c = 1{,}8c$ (!)

2. Pagal reliatyvistinę sudėties formulę

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \dfrac{v_1 \cdot v_2}{c^2}};$$

$$v = \frac{0{,}9c + 0{,}9c}{1 + \dfrac{0{,}9c \cdot 0{,}9c}{c^2}};$$

$$v = \frac{1{,}8c}{1 + 0{,}81} = \frac{1{,}8c}{1{,}81} = 0{,}994c.$$

Matome, kad reliatyvistiniams greičiams sudėti taikytina tik Einšteino formulė.

? *1. Parodykite 61.2 ir 61.5 paveiksluose, kurios grafikų dalys atitinka šiuolaikinės technikos pasiektus greičius.*
2. Kokios formos pasidarys kvadratas ir apskritimas, skriejantys dideliu greičiu stebėtojo atžvilgiu?
3. Analizuodami 61.2 paveikslą paaiškinkite, koks būtų kūno, judančio šviesos greičiu, ilgis.

61.3. Du elektronai juda išilgai vienos tiesės greičiais 0,9c ir 0,8c nejudančio stebėtojo atžvilgiu. Koks yra elektronų greitis vienas kito atžvilgiu, kai jie juda viena kryptimi ir kai juda priešingomis kryptimis?

---

62 paskaita

AR GALI ENERGIJA TAPTI MASE?

Dainuoju aukštą jausmo įtampą
Ir saulės spektrą širdyse,
Ir būseną, kai žmonės tampa
Energija, o ne mase.

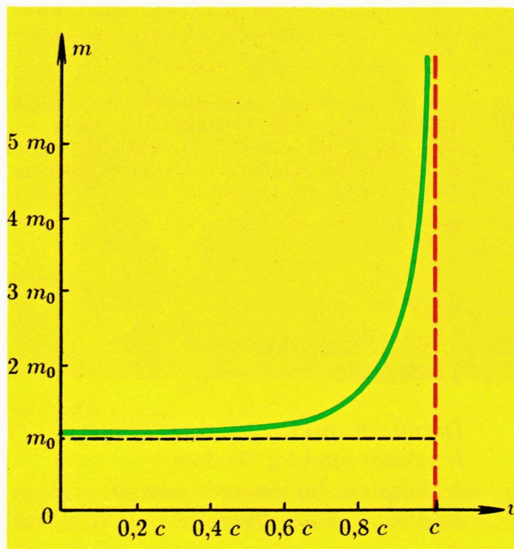
Justinas M a r c i n k e v i č i u s

§ 62.1. Masės reliatyvumas

Kiek sutrumpėjo — tiek pasunkėjo

Klasikinėje Niutono mechanikoje, kur susiduriama su dideliais kūnais ir palyginti nedideliais greičiais, masė laikoma pastoviu dydžiu. Iš Niutono dinamikos dėsnių išplaukią, kad bet kokios masės kūnas, ilgą laiką veikiamas pastovios jėgos, gali įgyti neribotai didelį greitį. Tačiau tai nesuderinama su reliatyvumo teorijos postulatu, kad joks kūnas negali judėti greičiu, lygiu šviesos greičiui.

Einšteino reliatyvumo teorijoje laikomi teisingais klasikinės dinamikos dėsniai. Tačiau, kad teorija būtų neprieštaringa, tenka pripažinti, jog *kūno masė yra reliatyvus dydis:* jos vertė priklauso nuo kūno judėjimo greičio, nuo sistemos, kurioje masė matuojama. Kūno, judančio greičiu v, **reliatyvistinei masei** m apskaičiuoti taikoma



62.1 pav.

Einšteino formulė

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \qquad (62.1)$$

čia m_0 — kūno savoji, arba rimties, masė (§ 61.1).

Kaip matome, *didėjant kūno greičiui, didėja jo masė,* todėl ta pati jėga suteikia vis mažesnį pagreitį. Kai greitis v artėja prie c, t. y. kai $v/c \approx 1$, (62.1) formulėje vardiklis artėja prie nulio ir masės vertė didėja neribotai. Begalinės masės kūno jau negali pagreitinti jokia jėga, todėl lemtingoji greičio riba $v = c$ ir negali būti pasiekta.

Net šiuolaikiniai kosminiai greičiai yra maži palyginti su šviesos greičiu, todėl judančių kūnų masės pakitimo neįmanoma pastebėti — lėtame pasaulyje lieka galioti Niutono mechanika. Tik artėjant prie šviesos greičio masė pradeda katastrofiškai augti: kai $v = 0{,}9c$, masė jau padidėja daugiau kaip 2 kartus. O šiuolaikiniuose galinguose greitintuvuose, kuriuose elektronai skrieja vos 40 km/s lėčiau nei šviesos spindulys, elektronų masė padidėja net 2000 kartų.

Reliatyvistinės masės kitimas priklausomai nuo greičio grafiškai atvaizduotas 62.1 paveiksle.

62.1. 1,00 kg masės kūnas juda $2{,}00 \cdot 10^5$ km/s greičiu. Kokią jo masę nustato nejudantis stebėtojas?

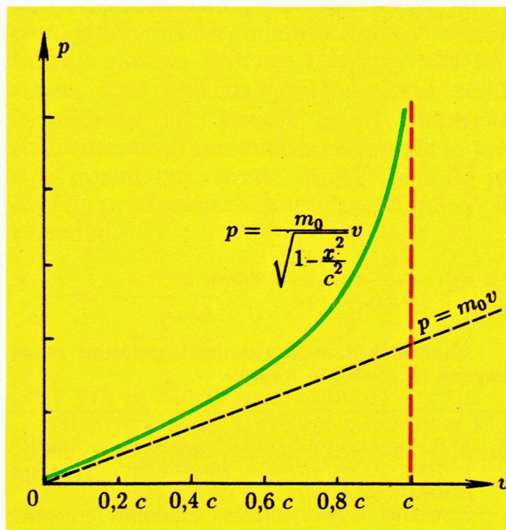
---

§ 62.2. Kūno impulso reliatyvumas

Masės reliatyvumas išjudino iš klasikinės rimties ir visus kitus su ja susijusius dydžius, tarp jų ir kūno impulsą. Klasikinėje fizikoje impulsas (p) apibrėžiamas kaip kūno masės ir greičio sandauga:

$$p = mv. \qquad (62.2)$$

Šis apibrėžimas nepakinta ir reliatyvistinėje



62.2 pav.

mechanikoje, tačiau vietoje nekintamos masės, lygios rimties masei m_0, atsiranda priklausoma nuo judėjimo greičio masė (62.1). Taigi reliatyvistinis impulsas

$$p=\frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \qquad (62.3)$$

Kaip kinta klasikinis ir reliatyvistinis impulsas, kintant kūno greičiui, parodyta 62.2 paveiksle.

Impulso tvermės dėsnis teisingas ir reliatyvistinėje mechanikoje.

62.2. Kokį impulsą turi elektronas, judantis greičiu $v=\frac{4}{5}c$? Elektrono rimties masė $m_0 \approx 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg.

---

§ 62.3. Masės ir energijos ryšio dėsnis

Garsiausia fizikos formulė

Reliatyvistinėje mechanikoje, kintant greičiui, kinta masė. Taigi, suteikdami kūnui kinetinės arba vidinės energijos, didiname jo masę. A. Einšteinas nustatė bendrą **reliatyvistinį masės ir energijos ryšį:** *pilnutinė kūno energija yra proporcinga jo masei:*

$$E=mc^2. \qquad (62.4)$$

Einšteino formulėje proporcingumo koeficientas — šviesos greičio kvadratas — yra milžiniškas skaičius, todėl su mažiausiais masės pokyčiais yra susiję milžiniški energijos pokyčiai.

Įrašę reliatyvistinę masės išraišką, gauname:

$$E=\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \qquad (62.5)$$

Kai kūnas yra rimties būsenoje, jo energija

$$E_0=m_0 c^2, \qquad (62.6)$$

susijusi su mase m_0, vadinama **rimties energija.**

Taigi kiekvienas kūnas turi energijos jau vien todėl, kad jis turi masę. Spinduliuodami energiją kūnai nustoja masės, o kūnai, kurie spindulius sugeria, įgyja daugiau energijos ir jų masė padidėja. Pavyzdžiui, Saulė kas sekundę išspinduliuoja $3{,}8 \cdot 10^{26}$ J energijos, ir tai atitinka $4 \cdot 10^9$ kg masės nuostolį. Per 10 milijonų metų Saulė išspinduliuoja tiek masės, kiek jos yra visoje Žemėje.

Ar tai reiškia, kad masė virsta energija ir atvirkščiai? Ne, šis vaizdus proceso apibūdinimas nėra tikslus. Masę turi kiekvienas emituojamas ar absorbuojamas fotonas (šiluminių, šviesos ir kt. spindulių). Žinodami jo energiją, jo masę galime apskaičiuoti pagal (62.4) formulę. Tačiau fotonai neturi rimties masės m_0 — jie neegzistuoja kitaip, kaip judėdami greičiu c. Taigi kūnui spinduliuojant dalis jo rimties masės virsta fotonų mase ir atitinkama dalis rimties energijos virsta spinduliavimo energija.

Medžiaga yra tarsi savotiškas sandėlys, kuriame gamta saugo savo energijos išteklius. Dalis jų, kaip vėliau pamatysime, panaudojama vykstant branduolinėms reakcijoms atominėse elektrinėse.

1 pavyzdys: 1 kg vandens sušilo nuo 10 iki 100 °C. Kiek padidėjo vandens masė?

S p r e n d i m a s. 1. Vanduo šildamas gauna $\Delta E = Q = mc_v \Delta t$ energijos. Proporcingai padidėja ir jo masė:

$$\Delta m=\frac{\Delta E}{c^2}; \qquad \Delta m=\frac{m c_v \, \Delta t}{c^2}.$$

2. Įrašome:

$m=1$ kg,

$c_v=4{,}2 \cdot 10^3$ J/kg K,

$\Delta t=100$ K,

$c=3 \cdot 10^8$ m/s;

$$\Delta m=\frac{1 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 90}{(3 \cdot 10^8)^2} \text{ kg}=4{,}2 \cdot 10^{-12} \text{ kg}.$$

Aišku, kad tokio masės pokyčio pastebėti neįmanoma.

2 pavyzdys. Sudeginus 1 kg akmens anglies, gaunama $3 \cdot 10^7$ J energijos. Kiek tonų anglies būtų galima sutaupyti panaudojus visą su 1 kg mase susijusią energiją?

Sprendimas. 1 kg masę atitinka rimties energija

$$E = mc^2;$$

$$E = 1 \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 9 \cdot 10^{16} \text{ J}.$$

Tokiam kiekiui energijos gauti reikėtų sudeginti anglies

$$\frac{9 \cdot 10^{16} \text{ J}}{3 \cdot 10^7 \text{ J/kg}} = 3 \cdot 10^9 \text{ kg}.$$

Vadinasi, būtų sutaupyta 3 mln. t anglies!

? *1. 62.1 ir 62.2 paveiksluose parodykite grafikų dalis, atitinkančias šiuolaikinės technikos pasiektus greičius.*
2. Kokiais greičiais judančių kūnų masę ir impulsą galime laikyti pastoviais?

62.3. Kokį masės pokytį atitinka energija, pagaminama per vieną valandą $2{,}5 \cdot 10^3$ MW galios elektrinėje?

62.4. Kokiu greičiu juda kūnas, jeigu jo masė, pasak nejudančio stebėtojo, lygi 4,0 kg, o rimties masė 2,4 kg?

Pakartokite § 38.1.

6 dalis
ATOMO BRANDUOLIO FIZIKA

6.1 skyrius
ATOMINĖ ENERGIJA

63 paskaita
LANGAS Į MIKROPASAULĮ

§ 63.1. Elementariųjų dalelių stebėjimo ir registravimo būdai

Pradedant tirti atomo branduolio struktūrą ir jį sudarančias daleles, būtina susipažinti su prietaisais ir įrenginiais, kuriais naudojantis išaiškinama dalelių prigimtis, matuojama jų energija ir radioaktyvių medžiagų spinduliavimo intensyvumas.

Vizualus dalelių skaitiklis

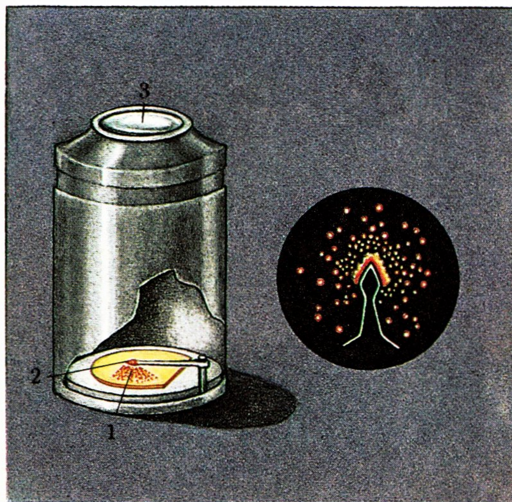
Greitos mikrodalelės ir fotonai, smogdami į fluorescuojančias medžiagas, sukelia silpnus, tačiau pastebimus plika akimi blykstelėjimus — scintiliacijas. Suskaičiavus žybsnius per vienetinį laiką, nustatomas tiriamojo radioaktyvaus preparato **aktyvumas** (jo skilimo greitis).

Paprasčiausias prietaisas, tinkantis α dalelių sukeliamiems žybsniams stebėti, yra **spintariskopas** (gr. *spinther* — kibirkštis, *skopeō* — žiūriu). Tai šviesos nepraleidžiantis vamzdelis (63.1 pav.), kurio viename gale yra cinko sulfidu padengtas ekranas *1*, o kitame — lupa *3* žybsniams stebėti. Tiriamoji medžiaga *2* įdedama į laikiklį arti ekrano. Vizualiai stebėti ir skaičiuoti scintiliacijas — ilgas varginantis darbas. Jį gali atlikti automatiškai fotoelektroniniai skaitikliai, kuriuose žybsnius fiksuoja fotoelementai (§ 56.3).

Jonizacinis dalelių skaitiklis

Elektringosios dalelės, skriedamos per dujas, susiduria su dujų atomais ir juos jonizuoja (§ 31.1). Šis reiškinys panaudotas dalelėms registruoti **Geigerio skaitiklyje.**

Skaitiklis sudarytas iš stiklinės jonizacijos kameros su dviem elektrodais: anodas yra plona vielelė, ištempta išilgai kameros, o katodas — metalo sluoksnis, dengiantis iš vidaus stiklą (63.2 pav.). Tarp anodo ir katodo sudaroma keleto šimtų voltų įtampa. Patekusi į kamerą elektringa dalelė jonizuoja dujas ir sukelia trumpalaikį srovės impulsą, kuris stiprinamas ir perduodamas į skaičiavimo mechanizmą.



63.1 pav.

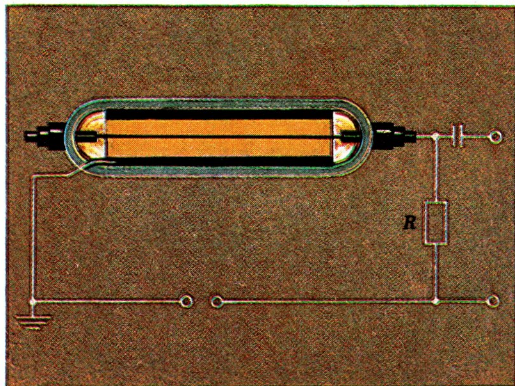
Geigerio skaitikliu galima užregistruoti iki 10 000 dalelių per sekundę. Šiais skaitikliais plačiai naudojasi ne tik fizikai, bet ir biologai, ekologai, medikai, geologai, archeologai ir kitų sričių darbuotojai.

Dalelių pėdsekys

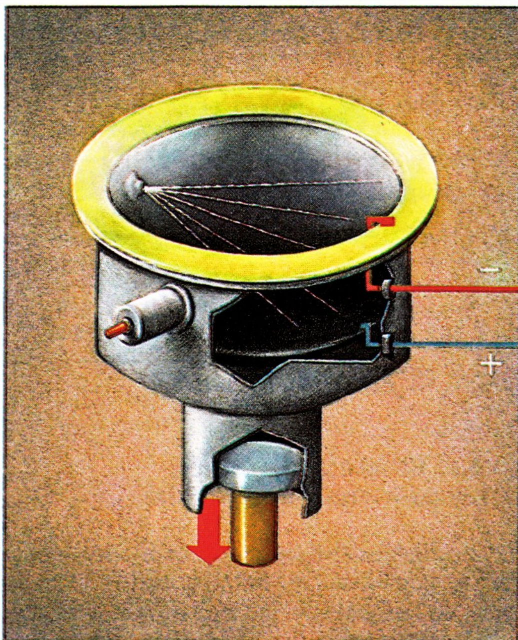
Aprašytieji prietaisai tik užfiksuoja greitas elementariąsias daleles. Vienas iš prietaisų, kuriuo galima ne tik skaičiuoti daleles, bet ir stebėti jų judėjimo trajektorijas, yra anglų fiziko Čarlio Vilsono (1869—1959) sukurta vadinamoji **Vilsono kamera.**

Vilsono kameros veikimas pagrįstas persotintųjų garų kondensacija — skysčio lašelių susidarymu — apie kondensacijos branduolius, kuriais būna dujų jonai, atsirandantys išilgai dalelės trajektorijos. Apie kiekvieną joną aktyviai kondensuojasi garai, ir išilgai dalelės trajektorijos susidaro ryškus rūko siūlelis — **trekas.**

Vilsono kamera — tai hermetiškai uždaromas indas, pripildytas sočiųjų vandens arba spirito garų (63.3 pav.). Viršutinė kameros dalis padaryta iš skaidrios medžiagos, apatinėje dalyje gali slankioti stūmoklis. Stūmoklį staigiai nuleidus, dujos išsiplečia ir atvėsta, todėl garai pasidaro persotintieji. Ši jų būsena nestabili. Jeigu tuo momentu skrieja per kamerą elektringa dalelė, tai ji jonizuoja molekules ir palieka treką. Į kamerą tiriamosios dalelės patenka pro specialų langelį. Kamerą stipriai apšvietus trekai fotografuojami.



63.2 pav.



63.3 pav.

Sudarius kameroje stiprų magnetinį lauką, elektringąsias daleles veikia Lorenco jėga (§ 38.1) ir jų trajektorijos iškrypsta. Išmatavus nuokrypio spindulį, apskaičiuojamas dalelių krūvis, greitis, energija.

Už efektyvaus elementariųjų dalelių stebėjimo metodo sukūrimą Č. Vilsonas 1927 m. apdovanotas Nobelio premija.

Pėdsakai iš burbuliukų

1952 m. amerikiečių fizikas Donaldas Glazeris sukūrė kamerą, kurioje dalelių trekams stebėti vietoj persotintų garų panaudojo perkaitintą skystį. Glazerio kameros

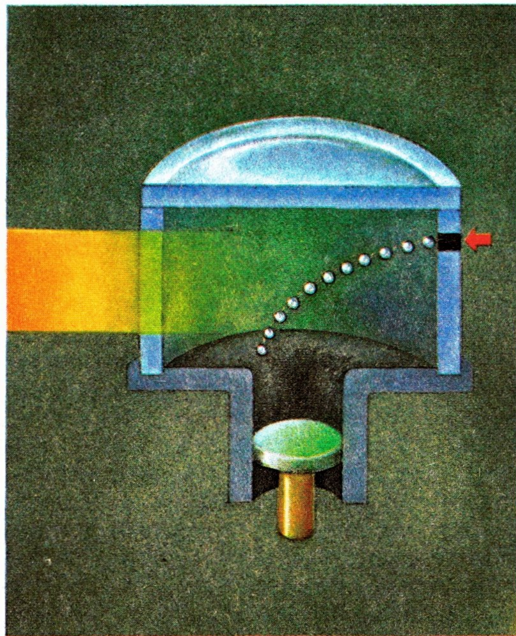
veikimas pagrįstas staigiu perkaitinto skysčio užvirimu ir garų burbuliukų susidarymu apie virimo centrus — skysčio jonus, atsirandančius išilgai dalelės trajektorijos. Apie kiekvieną joną susikaupia verdančio skysčio garai, ir jų burbuliukai sudaro išilgai dalelės trajektorijos ryškų treką. Glazerio kamera dėl to vadinama **burbuliukų kamera.**

Burbuliukų kamera — tai storasienis stiklinis indas (63.4 pav.), į kurį pripilta skaidraus lengvai užverdančio skysčio (freono arba skysto vandenilio). Skysčio temperatūra palaikoma aukštesnė už virimo temperatūrą, bet skystis neverda, nes stūmoklis jį laiko suslėgtą. Staigiai sumažinus slėgį, skystis pasidaro perkaitintas ir trumpą laiką būna šios nepastovios būsenos. Tuo momentu pralėkdama dalelė savo kelyje padeda skysčiui užvirti. Dalelės pėdsaką galima stebėti arba fotografuoti.

Burbuliukų kamera pranašesnė už Vilsono kamerą tuo, kad tų pačių dalelių trekai joje būna beveik tūkstantį kartų trumpesni, nes skysčio tankis didesnis negu dujų. Net didelę energiją turinčių dalelių trekai telpa kameroje, todėl patogu stebėti dalelių sąveiką su aplinkos branduoliais ir sukeliamas reakcijas.

Šiuo metu naudojamos burbuliukų kameros, kurių skersmuo siekia 2 m, o skysto vandenilio tūris — 30 m^3.

Už burbuliukų kameros išradimą D. Glazeris 1960 m. apdovanotas Nobelio premija.



63.4 pav.

§ 63.2. Radioaktyviojo skilimo dėsnis

Atomai „persikūnija“

Tiriant radioaktyviuosius elementus (§ 58.1) paaiškėjo, kad jų spinduliavimo priežastis yra atomų branduolių **savaiminis skilimas.** *Skylant branduoliams išlekia* α, β *dalelės ir skleidžiami* γ *spindulių kvantai, o atomai virsta kitų cheminių elementų atomais.* Pavyzdžiui, torio atomas, išspinduliavęs α dalelę, virsta radono atomu.

Radioaktyviųjų medžiagų aktyvumas laikui bėgant mažėja. Vienų elementų spinduliavimas susilpnėja sparčiai, per kelias minutes ar sekundes, kitų spinduliavimo susilpnėjimą sunku pastebėti net po kelerių metų.

Radioaktyvaus preparato aktyvumą rodo suskilusių per sekundę branduolių skaičius. Aktyvumo SI vienetas — vieno branduolio skilimas per sekundę — vadinamas **bekereliu** (Bq) prancūzų fiziko Antuano Bekerelio (1852—1908) garbei.

Medžiagos amžiaus formulė

Kyla klausimas: kokiu dėsniu kinta radioaktyviojo preparato aktyvumas? Nustatyta, kad

jis yra proporcingas esamam radioaktyviojo elemento atomų skaičiui ir praktiškai nepriklauso nei nuo to, ar įeina tas elementas į kokį nors cheminį junginį, nei nuo fizikinių sąlygų.

Kiekvieno radioaktyviojo elemento skilimo greitį apibūdina vadinamasis jo **pusamžis (puskiekio periodas)** — laikas, per kurį suskyla pusė radioaktyviosios medžiagos atomų. Savaime aišku, kad per tą laiką spinduliavimo galia sumažėja taip pat du kartus.

Įvairių radioaktyviųjų elementų pusamžiai labai skiriasi: pavyzdžiui, radžio pusamžis yra 1620 metų, o polonio — tik 3 min. Urano pusamžis nepaprastai ilgas — 4,5 mlrd. metų, nors kiekviename grame urano suskyla kas sekundė 12 000 atomų. Tačiau kai stebėjimo laikas yra trumpas palyginti su pusamžiu, praktiškai atrodo, kad preparato aktyvumas nekinta.

Pusamžis žymimas raide T. Jei pradiniu laiko atskaitos momentu yra N_0 radioaktyviosios medžiagos atomų, tai praėjus n pusamžių, t. y. momentu $t = nT$, *neskilusių* atomų skaičius N bus lygus

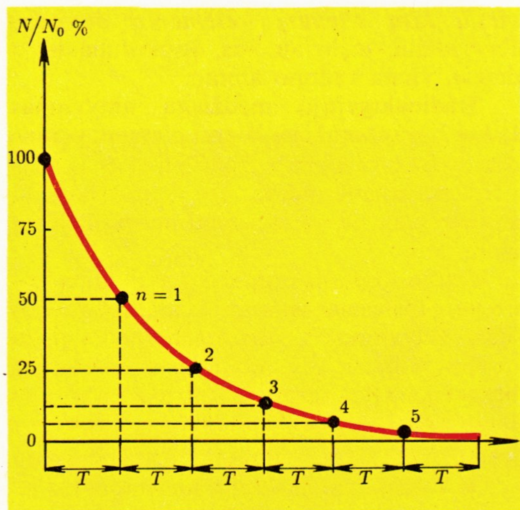
$$N = \frac{N_0}{2^n}. \qquad (63.1)$$

Per laiką t *suskilusių* atomų skaičiui ΔN rasti galime naudotis apytiksle formule

$$\Delta N = 0{,}693\ N_0 \frac{t}{T}. \qquad (63.2)$$

(63.1) ir (63.2) lygybės ir išreiškia matematiškai **radioaktyviojo skilimo dėsnį.**

63.5 paveiksle parodytas radioaktyvaus elemento aktyvumo mažėjimo, laikui bėgant, grafikas.



63.5 pav.

63.1. Buvo nustatyta, kad radioaktyviame preparate per minutę suskyla $6{,}4 \cdot 10^8$ branduolių. Koks yra to preparato aktyvumas, išreikštas rezerfordais ($1\ \mathrm{Rd} = 10^6$ skil./s)?

63.2. Švino kapsulėje yra $4{,}5 \cdot 10^{18}$ radžio atomų. Koks to radžio aktyvumas, jeigu jo pusamžis 1620 metų?

§ 63.3. Radioaktyviojo skilimo dėsnio pritaikymas

Radioaktyvusis Žemės laikrodis

Tiriant gamtinių radioaktyviųjų medžiagų spinduliavimo aktyvumą, galima nustatyti jų amžių, kartu ir įvairių uolienų, ir visos Žemės amžių.

Žemės amžius skaičiuojamas nuo to laiko, kai susikristalizavo uolienos ir susidarė kieta Žemės pluta. Daugiausia žinių apie ją pateikia uranas, kuriam skylant susidaro kiti taip pat radioaktyvūs elementai, o galutinis skilimų produktas yra švinas. Nustatyta, kad urano turinčiuose mineraluose jų susidarymo metu švino nebuvo — jis atsirado ir kaupėsi jau kietoje uolienoje skylant uranui. Iš švino ir urano santykio mineraluose, taikant radioaktyviojo skilimo dėsnį, apskaičiuojamas uolienų amžius. Seniausių Žemės uolienų amžius — per 4 mlrd. metų.

Nenykstantis mirties liudijimas

Visuose gyvuose organizmuose — ir augaluose, ir gyvūnuose, vykstant gyvybiniams procesams, palaikoma pastovi anglies, kartu ir radioaktyvios anglies atmainos C-14, koncentracija. Ją lengva nustatyti matuojant spinduliavimą. Kiekvienas gramas šios anglies skleidžia 15,3 β dalelių per minutę. Anglies koncentracija gyvuose organizmuose nepriklauso nei nuo geologinės epochos, nei nuo klimato sąlygų. Grame gyvos medienos šiandien yra tiek pat C-14 atomų, kaip ir prieš tūkstančius metų. Organizmui žuvus, radioaktyviosios anglies į jį daugiau nepatenka ir dėl skilimo jos koncentracija mažėja. Žinant C-14 pusamžį (5568 m.) ir nustačius organizmo liekanose esančios anglies spinduliavimo aktyvumą, galima apskaičiuoti, kiek laiko prabėgo nuo jo žūties. Šiuo tikslu nedidelis tiriamo objekto medžiagos kiekis sudeginamas ir Geigerio skaitikliu nustatomas anglies aktyvumas.

Taigi, nutrūkus gyvybės procesams, sustoja organizmo biologinis laikrodis, rodantis gyvavimo trukmę (šio laikrodžio „rodyklės“ yra medžio rievės arba raukšlės žmogaus veide) ir įsijungia radioaktyvusis „mirties laikrodis“.

Už radioaktyviosios anglies C-14 metodo organinės kilmės geologinių ar archeologinių radinių amžiui nustatyti sukūrimą ir pritaikymą JAV fizikas Vilardas L i b i s (1908—1980) 1960 m. apdovanotas Nobelio premija.

?

1. Kodėl β dalelės sukelia tik labai silpną spintariskopo ekrano švytėjimą?
2. Kodėl Geigerio skaitiklio jonizacijos kameroje dujos turi būti praretintos?
3. Koks fizikinis procesas pritaikytas ir Geigerio skaitiklyje, ir Vilsono kameroje?
4. Analizuodami 63.5 paveikslą nustatykite, kiek procentų radioaktyviosios medžiagos liko praėjus 3, 4, 5 ir 6 pusamžiams.

63.3. Per kiek laiko preparate, kurio aktyvumas pastovus ir lygus 8,2 Rd, suskyla $25 \cdot 10^8$ branduolių?

63.4. Kuri dalis radioaktyvaus kobalto izotopo $^{58}_{27}Co$ suskyla per 20 parų, jeigu jo pusamžis 72 paros? Per kiek laiko suskyla tokia pat dalis izotopo $^{60}_{27}Co$ atomų, jeigu pastarojo pusamžis 5,3 metų?

---

64 paskaita

KUR SLYPI ATOME DIDŽIAUSIA ENERGIJA?

§ 64.1. Neutrono atradimas

Prisiminkime

Mokydamiesi pirmąjį fizikos kursą, trumpai susipažinome su dar viena atomuose esančia dalele *neutronu*. Neutronai kartu su protonais įeina į atomų branduolius. Tai neutralios (neturinčios elektros krūvio) dalelės, kurių masė maždaug lygi protono masei.

Norint suprasti atomo branduolio sandarą, žinias apie neutroną būtina papildyti.

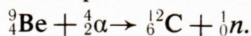
Neutrono gimimo reakcija

Neutronas buvo atrastas 1932 m. švitinant Vilsono kameroje berilį α dalelėmis. Pataikius α dalelei į berilio branduolį, pastarasis išspinduliuoja neutroną ir virsta anglimi.

Atomų branduoliai žymimi cheminių elementų simboliais, o elementariosios dalelės — sutartinėmis raidėmis, prie kurių prirašomi du indeksai: apatinis indeksas rodo branduolio arba dalelės krūvį, o viršutinis — atominę masę. Todėl neutrono, kurio krūvis lygus nuliui, o masė artima atominiam masės vienetui, simbolis: $^{1}_{0}n$. α dalelę, turinčią krūvį, lygų dviem elementariesiems, ir masę, lygią 4 atominiams masės vienetams (a.m.v.), galima žymėti

$^4_2\alpha$; tačiau būtent toks yra He atomo branduolio krūvis ir masė, todėl dažnai α dalelė žymima $^4_2$He — ji yra He atomo branduolys.

Minėtąją neutrono gimimo branduolinę reakciją, vartodami tokius simbolius, užrašome šitaip:



$$^9_4\mathrm{Be} + ^4_2\alpha \rightarrow ^{12}_6\mathrm{C} + ^1_0 n.$$

Atkreipkite dėmesį į tai, kad viršutinių ir apatinių skaičių suma vykstant reakcijai nepakinta — branduolinėms reakcijoms galioja krūvio ir masės skaičiaus tvermės dėsnis.

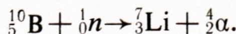
Neutrono atradimas suteikė fizikams naują galingą įrankį atomų branduoliams paveikti. Už šį atradimą anglų fizikas Džeimsas Čedvikas (1891—1974) 1935 m. apdovanotas Nobelio premija.

Neutrono savybės

Neturėdami krūvio, neutronai nejonizuoja atomų, nes nesąveikauja su atomų elektronais. Todėl jie yra labai skvarbūs — prasiskverbia net pro 20 cm švino sluoksnį.

Neutronų neveikia nei branduolių elektrostatinė stūma, stabdanti ir nubloškianti į šalį teigiamas α daleles. Susidūrę su branduoliais, neutronai į juos įsiskverbia, sutrikdo jų stabilumą ir sukelia branduolines reakcijas.

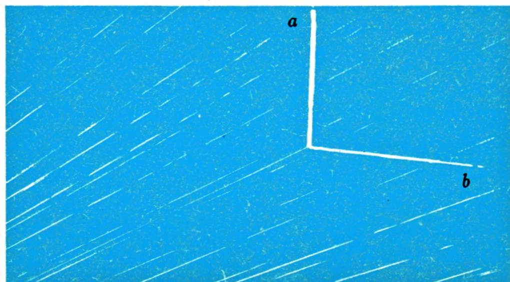
Neutronai nepalieka pėdsakų nei Vilsono, nei burbuliukų kamerose, nesukelia scintiliacijų ir nenukrypsta magnetiniame arba elektriniame lauke. Todėl apie jų buvimą galima spręsti tik iš antrinių reiškinių — jų sukeliamų branduolinių reakcijų. Pavyzdžiui, susidūręs su boro branduoliu neutronas nustoja egzistavęs, o atsiranda ličio branduolys ir α dalelė:



$$^{10}_5\mathrm{B} + ^1_0 n \rightarrow ^7_3\mathrm{Li} + ^4_2\alpha.$$

Matuojant ličio branduolio ir α dalelės trekus, patikimai nustatoma neutrono masė ir greitis.

64.1 paveiksle matome „nei iš šio, nei iš to" įvykusio boro branduolio skilimo fotografiją burbuliukų kameroje (*a* — ličio, *b* — α dalelės pėdsakas).



64.1 pav.

§ 64.2. Atomo branduolio sandara

Žvilgsnis į branduolio vidų

Iki pat neutrono atradimo nebuvo priimtinos atomo branduolio sandaros teorijos. Radioaktyviųjų medžiagų α ir β spinduliavimas vertė galvoti, kad branduoliai kažkaip sudaryti iš protonų ir elektronų. Tačiau šioje prielaidoje slypėjo daug prieštaravimų.

Aptikus neutroną, iš karto kilo mintis, kad atomo branduolys sudarytas iš protonų ir neutronų. Pirmasis šią hipotezę pareiškė 1932 m. vokiečių mokslininkas Verneris Heizenbergas (1901—1976).

Protoninis-neutroninis branduolio modelis greitai buvo patvirtintas eksperimentais ir visuotinai pripažintas. Toliau, susipažindami su šiuo modeliu, turime gauti atsakymą į du svarbius klausimus: kiek kurių dalelių yra branduolyje ir kokios jėgos jas laiko drauge? Atomas yra neutralus, taigi *protonų skaičius branduolyje ir elektronų skaičius atomo apvalkale* (Z) *yra lygūs*. Vadinasi, cheminio elemento eilės numeris Z periodinėje lentelėje kartu rodo ir atomo branduolio krūvį.

Kadangi neutrono ir protono masės beveik lygios, tai atomo masės skaičius A rodo bendrą neutronų ir protonų skaičių branduolyje:

$$A = N + Z. \qquad (64.1)$$

Taigi *branduolys sudarytas iš Z protonų ir N = A — Z neutronų.*

Branduolio dalelės „supakuotos" itin glaudžiai. *Medžiagos tankis visuose branduoliuose vienodas ir lygus 10^{17} kg/m^3.* Taigi 1 cm^3 branduolinės medžiagos masė būtų 100 mln. tonų!

Tarp atomų branduolių gali vykti reakcijos (§ 64.1). *Vykstant branduolinėms reakcijoms, vieni cheminiai elementai virsta kitais.* Taip išsipildo viduramžių alchemikų svajonė.

Broliai dvyniai — izotopai

Iš chemijos kurso žinome, kad daugumos cheminių elementų atomai gali būti kelių atmainų: turėdami tokį pat branduolio krūvį, jie skiriasi mase. Šios vieno elemento atomų atmainos vadinamos **izotopais** (gr. *izo* — vienodas, *topos* — vieta). Pavyzdžiui, žinomi keturi urano izotopai: $^{234}_{92}U$, $^{235}_{92}U$, $^{238}_{92}U$ ir $^{239}_{92}U$.

Suprantama, *visų izotopų branduoliuose yra tiek pat protonų, bet skirtingas skaičius neutronų.*

To paties elemento izotopai yra nevienodai patvarūs ir nevienodai paplitę. Daugelis elementų, kuriuos laikome neradioaktyviais, turi ir radioaktyvių izotopų (pvz., anglis $^{14}_{6}C$; § 63.3).

Svarbią reikšmę praktikoje turi vandenilio izotopai **deuteris** $^{2}_{1}H$ ir **tritis** $^{3}_{1}H$.

Naudojantis masių spektrografais (§ 38.1), rasti ir išskirti visų cheminių elementų izotopai.

„Ėjimai" periodinėje lentelėje

Paaiškėjus branduolio sandarai, paaiškėjo ir radioaktyviųjų elementų skilimo esmė. Išmetusio α dalelę ($^{4}_{2}He$) branduolio masė sumažėja 4 a.m.v., o krūvis sumažėja dviem vienetais. Dėl to elementas pakinta — virsta naujo elemento, esančio periodinėje lentelėje dviem langeliais arčiau pradžios, vienu izotopu.

Išmetusio β dalelę ($^{0}_{-1}e$) branduolio masė nepakinta. Tačiau elektronų branduolyje nėra, vadinasi, vienas branduolio neutronas skyla virsdamas protonu ir elektronu. Dėl to atomo krūvis vienetu padidėja. Atsiranda naujo elemento, esančio lentelėje vienu langeliu toliau, izotopas.

▲ **64.1.** Kuo pavirs $^{238}_{92}U$ po vieno α skilimo ir dviejų β skilimų?

▲ **64.2.** Kaip $^{238}_{92}U$ branduoliai virsta $^{239}_{92}Pu$ branduoliais?

---

§ 64.3. Branduolio ryšio energija

Galiūnas trumpomis rankomis

Protonus ir neutronus (kartu jie vadinami **nukleonais**) branduolyje laiko ypatingai stiprios jėgos, vadinamos **branduolinėmis jėgomis.** Tai pačios stipriausios jėgos gamtoje. Branduolinės jėgos maždaug 100 kartų stipresnės už elektrines stūmos jėgas tarp protonų. Tik šių jėgų dėka branduoliai yra stabilūs.

Branduolinės jėgos pasireiškia tarp bet kurių dviejų nukleonų, bet tik labai nedideliais nuotoliais — iki $2 \cdot 10^{-15}$ m. Didėjant atstumui branduolinės jėgos staigiai mažėja ir išnyksta, kai jis viršija $3 \cdot 10^{-15}$ m. O jeigu nukleonai suartėja iki $0{,}5 \cdot 10^{-15}$ m, branduolinės jėgos tampa stūmos jėgomis.

Branduolinių jėgų prigimtis dar nėra iki galo išaiškinta.

Branduolių virsmų energetika

Protonai ir neutronai branduolyje „suveržti" milžiniškomis branduolinėmis jėgomis. *Norint*

suskaidyti branduolį į pavienius nukleonus, reikėtų nugalėti milžiniškas branduolines jėgas, taigi atlikti darbą, išeikvoti energiją. Ši energija vadinama **branduolio ryšio energija.** Kuo stipresnis branduolio dalių ryšys, tuo didesnė ryšio energija.

Teisingas ir atvirkščias teiginys: *susidarant iš atskirų nukleonų branduoliui, išsiskiria energija, lygi branduolio ryšio energijai.*

Kur dingo masė?

Žinant energijos ir masės ryšį, kyla klausimas: jei, susidarant branduoliui, turi išsiskirti ryšio energija, tai ar neturi pakisti ir masė? Iš tikrųjų, tiksliai išmatavus masių spektrografais atomų branduolių mases, nustatyta, kad *branduolio masė visada yra mažesnė už jį sudarančių nukleonų masių sumą.* Nukleonų masių sumos ir branduolio masės skirtumas Δm vadinamas **masės defektu.** Įvairių branduolių masės defektas skirtingas, bet jis būdingas visiems branduoliams, sudarytiems bent iš dviejų nukleonų. Pavyzdžiui, helio branduolio masė vienu procentu mažesnė už jį sudarančių dviejų protonų ir dviejų neutronų masių sumą.

Masės defektas patvirtina energijos išsiskyrimą susidarant branduoliui. Pagal Einšteino formulę (62.4), išsiskyrusi energija

$$\Delta E = \Delta m c^2.$$

Vadinasi, masės defektas Δm yra branduolio ryšio energijos matas.

Apie ryšio energijos dydį galima spręsti iš tokio pavyzdžio: susidarius iš nukleonų 10 g helio, išsiskirtų tiek energijos kaip sudegus 15 vagonų akmens anglies.

Branduolių ryšio energijos išlaisvinimu pagrįsta atominė (tiksliau sakant, branduolinė) energetika.

§ 64.4. Biologinis radioaktyviųjų spindulių veikimas

Pavojingi trekai žmogaus kūne

Visų branduolinių reakcijų palydovas — radioaktyvumas. Jau pirmuosius šių reakcijų tyrinėtojus domino ir klausimas, kaip gi didelės energijos dalelės ir spindulių kvantai veikia gyvą organizmą. Šiandien žinoma, koks intensyvus ir sudėtingas, kartais — mirtinai pavojingas yra jų poveikis. α ir β dalelės, taip pat Rentgeno ir γ spinduliai eidami per kūno audinius jonizuoja atomus. Gyvo audinio molekulės dėl to pakenkiamos, gali ir žūti. Pirmiausia spinduliai pažeidžia kaulų čiulpus — raudonųjų kraujo kūnelių „gamyklas“. Jonizuojantieji spinduliai, beje, labai klastingi: net mirtinų dozių tuo metu žmogus gali nepajusti, nes šie spinduliai neveikia jutimo organų, nesukelia skausmo. Todėl būtina spinduliavimo kontrolė, ir ne tik ten, kur dirbama su radioaktyviosiomis medžiagomis.

Radiacijos matavimo vienetai

Jonizuojančiųjų spindulių energijos kiekis, absorbuotas 1 kg kūno masės, vadinamas **sugertąja radiacijos (spindulių) doze** (D):

$$D = \frac{E}{m}; \qquad (64.2)$$

čia E — visų absorbuotųjų spindulių energija, m — kūno masė.

Sugertosios dozės SI vienetas vadinamas **grėjumi** ir žymimas Gy. *Grėjus yra tokia jonizuojančiųjų spindulių sugertoji dozė, kai kiekvienam kūno masės kilogramui tenka 1 J spindulių energija:* 1 Gy = 1 J/1 kg.

Tos pačios sugertosios spindulių dozės poveikis gali būti skirtingas, jei ji sugeriama per skirtingą laiką. Todėl svarbu žinoti dozę, kurią organizmas sugeria per vieną sekundę, t. y. **dozės galią** ($\dot{D}$):



64.2 pav.

$$\dot{D} \cong \frac{D}{t}\,. \qquad (64.3)$$

Dozės galios SI vienetas yra **grėjus per sekundę** (Gy/s).

Mirtina ir leistina radiacijos dozė

Žmogaus organizmą nuolat veikia natūralus gamtinis — vadinamasis foninis — spinduliavimas. Dėl jo gauname maždaug 0,001 Gy dozę per metus. Prie šios foninio spinduliavimo dozės augalai ir gyvūnai yra prisitaikę, ir ji nekenkia.

Žmogus, per trumpą laiką gavęs maždaug 4 Gy dozę, suserga sunkia spinduline liga ir dažniausiai miršta.

Tarptautinė radiologinės apsaugos komisija žmonėms, dirbantiems padidinto spinduliavimo aplinkoje, yra nustačiusi **leistinąją dozės galią** 0,05 Gy per metus. Taigi leidžiama dirbti aplinkoje, kurioje spinduliavimas 50 kartų stipresnis už natūralų foną. Gyvenamosioms vietoms leistinoji dozė yra 10 kartų mažesnė — tik 5 kartus didesnė už natūralų foną.

64.2 paveiksle parodytas sutartinis ženklas, perspėjantis apie padidėjusią radiaciją.

Radiologinės apsaugos tarnyba stebi foninės radiacijos svyravimus. Tam tikrose vietose nedideliame aukštyje ištempiamas specialus audinys, kuriame kaupiasi su krituliais ir dulkėmis nusėdančios radioaktyvios medžiagos. Audinys periodiškai keičiamas, deginamas ir matuojama natūrali radiacija.

Ištemptas didokas audinio gabalas patraukė smalsuolių dėmesį. Pakabinus įspėjimą: „ATSARGIAI — FONINĖ RADIACIJA", smalsuoliai dingo.

Kiekvienas nuodas yra ir vaistas

Įrodyta, kad nedidelės vienkartinės spindulių dozės skatina gyvybinius procesus. Todėl švitinimu paspartinamas augalų ir gyvulių augimas, didinamas produktyvumas, gerinama kokybė. Apšvitinus sėklas sutrumpėja dygimo laikas, 10—20% padidėja derlingumas. Bulvėse susikaupia daugiau krakmolo, vynuogėse — cukraus, morkose — karotino. Ypač efektyvu švitinti auginamas šiltnamiuose daržoves. Apšvitinus kiaušinius, prieš dedant juos į inkubatorių, išsirita stipresni viščiukai, geriau auga, o vištų dėslumas padidėja iki 15%.

Biologiniam švitinimui gaminami specialūs kilnojamieji gama įrenginiai.

?

1. Kodėl neutronai nepalieka pėdsakų nei Vilsono, nei burbuliukų kameroje?

2. Kodėl skilo 64.1 paveiksle parodytas boro branduolys?

3. Ličio branduolio simbolis yra $^{7}_{3}\mathrm{Li}$. *Kiek ličio branduolyje yra protonų, neutronų ir kiek elektronų skrieja apie jo branduolį?*

4. Kaip gali β skilimo metu branduolys išspinduliuoti elektroną, jeigu branduolyje elektronų nėra?

64.3. Kuo pavirs $^{210}_{81}\mathrm{Tl}$ po trijų nuoseklių β skilimų ir vieno α skilimo?

64.4. Izotopo $^{211}_{83}\mathrm{Bi}$ branduolys atsirado iš kito branduolio po vieno α skilimo ir vieno β skilimo. Koks buvo pirminis branduolys?

Tema referatui: „Fizikai — Nobelio premijos laureatai".

65 paskaita

ENERGETIKOS MILŽINAS PRIE DRŪKŠIŲ EŽERO

§ 65.1. Sunkiųjų elementų branduolių dalijimasis

Branduolių dalijimosi reakcija

Visose anksčiau nagrinėtose branduolinėse reakcijose atomo branduolys, išspinduliavęs (kartais — prieš tai absorbavęs) elementariąją dalelę, virsta to paties arba kaimyninio elemento izotopo branduoliu. 1938 m. vokiečių mokslininkai Oto H a n a s ir Fricas Š t r a s m a n a s, apšaudydami neutronais, atrado naujo tipo branduolinę reakciją — **branduolio dalijimąsi.** Šioje reakcijoje branduolys skyla į dvi apylyges dalis, vadinamas **branduolio skeveldromis.** Todėl atsiranda du nauji elementai, esantys apie periodinės lentelės vidurį. Tarp jų būna daug nestabilių — radioaktyvių — izotopų.

Branduoliui dalijantis išsiskiria daug energijos ir išmetami 2—3 didelę kinetinę energiją turintys neutronai. Pavyzdžiui, urano-235 branduolys gali pasidalyti šitaip:



$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{139}_{56}Ba + ^{95}_{36}Kr + 2^{1}_{0}n.$$

Dalijasi sunkieji branduoliai. Juose yra daug protonų, ir elektrinė tarpusavio stūma darosi reikšminga. Kad ir kokios stiprios yra branduolinės traukos jėgos, Kulono jėgos sunkiųjų elementų branduoliuose sumažina ryšio energiją ir branduolių stabilumą.

65.1 pav.

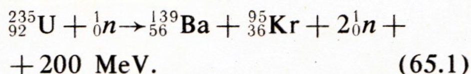
65.2 pav.

Todėl, pataikius į urano branduolį neutronui, šis susižadina, ima virpėti, deformuotis ir suskyla (65.1 pav.).

Svarbiausia yra tai, kad, skylant vienam branduoliui, išsiskiria milžiniška — apie 200 MeV (!) — energija.

Urano energijos slėptuvė

Taigi aukščiau užrašytą urano dalijimosi reakciją reikia patikslinti:



$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{139}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{95}_{36}\mathrm{Kr} + 2{}^{1}_{0}n + $$
$$+ 200\ \mathrm{MeV}. \qquad (65.1)$$

Pasidalijus visiems branduoliams, esantiems 1 g urano, išsiskirtų apie $2{,}2 \cdot 10^4$ kW·h energijos, kurios užtektų 750 t vandens užvirinti.

Išsiskiriant reakcijos metu tokiai energijai, turi susidaryti ir pastebimas masės defektas. Iš tikrųjų, rašant reakcijas, masių skaičiai yra suapvalinami iki sveikųjų skaičių. Tik todėl ir atrodo, kad jų suma nepakinta. Tačiau apskaičiavus tiksliai *branduolio skeveldrų ir neutronų bendra masė mažesnė už buvusio urano branduolio masę 0,1%*. Būtent su šiuo masės sumažėjimu reakcijos metu ir susijusi didžiulė išsiskirianti energija $E = \Delta mc^2$.

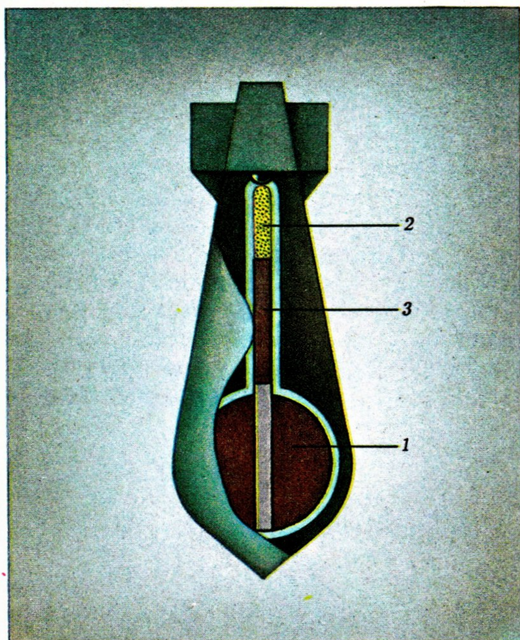
§ 65.2. Grandininė reakcija

Unikali urano izotopo savybė

Pasidalijus urano izotopo $^{235}_{92}\mathrm{U}$ branduoliui, vietoj vieno absorbuoto neutrono atsiranda

du-trys nauji laisvi neutronai. Šis faktas labai svarbus, tiesiog lemtingas branduolio dalijimosi energijos, paprastai vadinamos atomine energija, panaudojimui. Iš gamtoje esančių branduolių šia ypatybe pasižymi $^{235}_{92}U$. Todėl *dalijimosi reakcija urano izotope* $^{235}_{92}U$ *gali savaime plėstis:* skilus branduoliui atsiradę neutronai suskaldo kitus branduolius, iš jų išlėkę neutronai — dar daugiau branduolių ir t. t. (65.2 pav.). Neutronų ir skylančių branduolių vis daugėja, reakcija plečiasi tarsi ugnis šiaudų kūgyje.

Tokia savaime besiplečianti branduolinė reakcija vadinama **grandinine dalijimosi reakcija.** Reakcijos pradžiai užtenka tų kelių neutronų, kurie visuomet būna urane dėl savaiminio kai kurių branduolių dalijimosi.



65.3 pav.

Dvi grandininės reakcijos sąlygos

Tačiau realiomis sąlygomis anaiptol ne visi antriniai neutronai sukelia naujų branduolių dalijimąsi: vieni jų, nepataikę į branduolį, išlekia iš urano gabalo, kitus pagauna nesidalijantys kitų izotopų branduoliai. Todėl prasidėjusi reakcija gali nuslopti. Grandininei reakcijai vykti reikalingos tam tikros sąlygos:

1. Gamtiniame urane izotopo $^{235}_{92}U$ koncentracija yra tik 0,7%. Ji turi būti padidinta iki 5—20%, žiūrint kokia reaktoriaus konstrukcija.

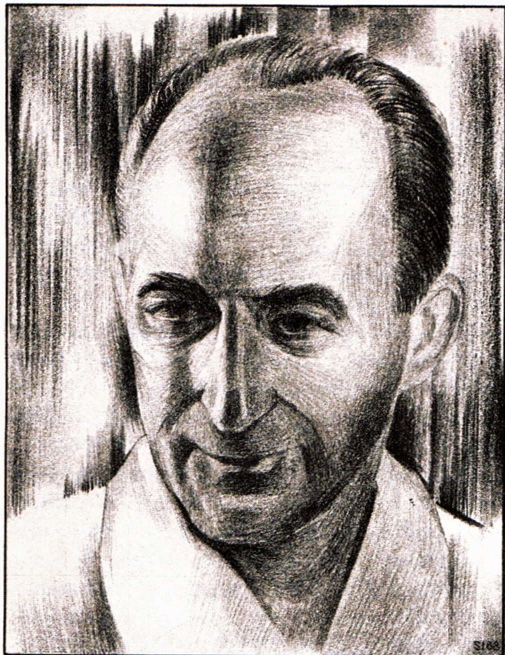
2. Branduolinio kuro kiekis turi būti ne mažesnis už tam tikrą ribinį. Urano mažiausia būtina masė, vadinama **krizine mase,** lygi maždaug 50 kg (tai tik 20 cm skersmens rutulys), plutonio — 10 kg.

Branduolinio kuro krizinę masę galima žymiai sumažinti apsupus branduolinį kurą **neutronų reflektoriumi** — gerai atspindinčia neutronus medžiaga, pavyzdžiui, grafitu arba beriliu. Reflektorius grąžina atgal išlekiančius iš urano neutronus ir sustiprina reakciją.

Jeigu branduolinio kuro masė staiga pasidaro didesnė už krizinę, grandininė reakcija gali labai sparčiai stiprėti. Staiga išsiskiria milžiniška energija — įvyksta **branduolinis sprogimas.**

Kaip veikia atominė bomba

Tokiu principu susprogdinama atominė bomba (65.3 pav.). Bombos viduje esantis uranas perskirtas į dvi dalis (*1*), kurių kiekvienos masė mažesnė negu krizinė, o abiejų drauge — didesnė. Kai sprogdiklis (*2*) į tarpą tarp atominio užtaiso dalių įmuša urano pleištą (*3*), masė tampa didesnė už krizinę ir bomba sprogsta. Kad grandininė reakcija vyktų labai greitai, bomboms naudojamas grynas uranas-235 arba dirbtinis radioaktyvus elementas plutonis $^{239}_{94}Pu$.


Enrikas Fermis (1901—1954)

Sprogus bombai išsilaisvina milžiniška energija, ir aplinkos temperatūra pakyla iki kelių milijonų laipsnių. Sprogimo metu spėja sureaguoti maždaug 5% atominio kuro. Kita jo dalis išsisklaido, užteršdama atmosferą ir žemės paviršių radioaktyviomis medžiagomis.

Valdoma grandininė reakcija

Grandininės reakcijos plėtojimąsi galima valdyti — pagreitinti arba sulėtinti, todėl galima pasiekti, kad ji vyktų stabiliai, o ne sprogimu. Šiam tikslui branduolinio kuro masė perveriama strypais iš tokios medžiagos, kuri smarkiai absorbuoja neutronus (kadmio arba boro). Ištraukiant arba giliau įleidžiant strypus, reguliuojamas reakcijoje dalyvaujančių neutronų skaičius, taigi ir reakcijos greitis.

Pirmą kartą valdomą grandininę reakciją sukėlė 1942 m. Jungtinėse Amerikos Valstijose italų fizikas Enrikas Fermis (1901—1954).

1946 m. įvykdė valdomą grandininę reakciją Sovietų Sąjungoje fizikų kolektyvas, vadovaujamas Igorio Kurčiatovo (1903—1960).

§ 65.3. Branduolinis reaktorius

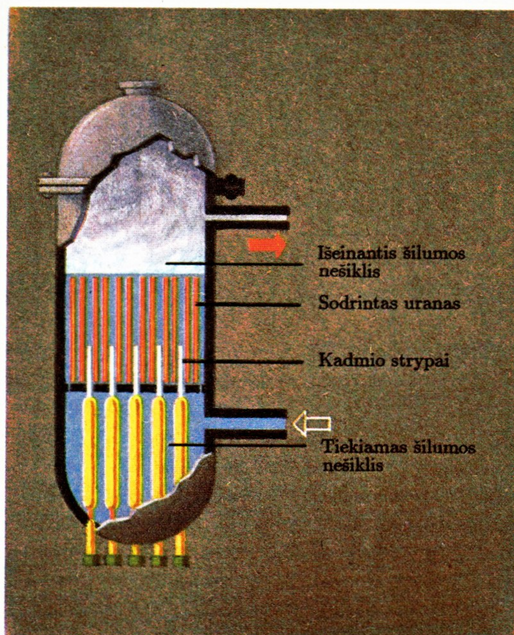
Atominis „garo katilas"

Įrenginys, kuriame vyksta valdoma branduolinė grandininė reakcija, vadinamas **branduoliniu reaktoriumi** (65.4 pav.). Branduolinio kuro reaktoriuje yra kur kas daugiau negu krizinė masė, todėl reaktorius ilgai gali dirbti nepapildant kuro. Grandininė reakcija valdoma neutronus absorbuojančiais kadmio strypais. Svarbiausia reaktoriaus dalis yra sodrinto urano elementai, išdėstyti grafito blokuose. Visa tai sudaro reaktoriaus *aktyviąją zoną*.

Grafitas aktyviojoje zonoje atlieka *neutronų lėtiklio* vaidmenį. Sulėtintų neutronų nepagauna kitų urano izotopų branduoliai, todėl grandininė reakcija gali vykti ir palyginti nedaug sodrintame izotopu $^{235}_{92}U$ (iki 5%) gamtiniame urane. Neutronus gali lėtinti ne tik grafitas, geras lėtiklis yra sunkusis vanduo.

Siekiant sukliudyti neutronams išlėkti iš reaktoriaus, aktyvioji zona apsupama *neutronų reflektoriais* (dažniausiai grafito plokštėmis).

Visa branduolinių reakcijų metu išsiskirianti energija praktiškai virsta šilumine energija, todėl reaktoriaus aktyvioji zona smarkiai įkaista. Ja specialiais kanalais cirkuliuoja didelio slėgio veikiamas vanduo (rečiau kitas skystis arba dujos) — *šilumos nešiklis*. Įkaitęs maždaug iki 700 °C šilumos nešiklis perduoda šilumą garo generatoriui.



65.4 pav.

Veikiantis branduolinis reaktorius skleidžia daug neutronų ir γ spindulių, todėl jis padengiamas storu (iki 3 m) apsauginiu gelžbetonio sluoksniu.

Atominės elektrinės schema

Atominis reaktorius, garo turbina ir elektros generatorius sudaro atominės elektrinės energinę sistemą (65.5 pav.).

Tekantis uždaru kontūru per reaktorių šilumos nešiklis (vanduo) tampa radioaktyvus, todėl jis naudojamas tik antrojo kontūro vandeniui šildyti. Siurblio varomas į *šilumokaitį* šilumos nešiklis atiduoda šilumą vandeniui garinti; susidaręs garas suka turbiną, sujungtą su elektros generatoriumi.

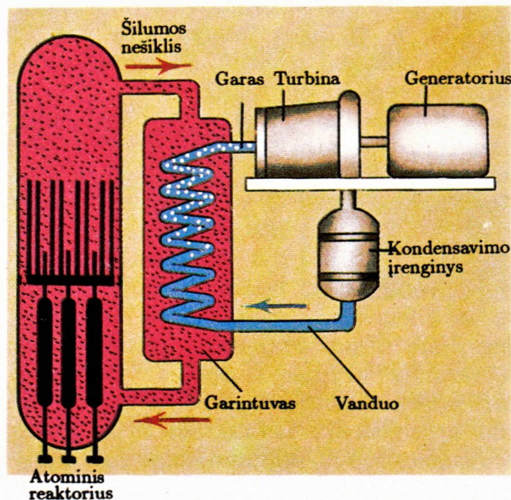
Pirmoji pasaulyje atominė elektrinė paleista 1954 m. Obninske (netoli Maskvos).

Atominės elektrinės: už ir prieš

Atominėje elektrinėje per metus suvartojama tiek kuro, kiek tokios pat galios šiluminėje elektrinėje sudeginama per dvidešimt minučių. Taigi atominėse elektrinėse beveik išvengiama kuro gabenimo išlaidų. Be to, anglis, nafta ir dujos yra vertinga žaliava chemijos pramonei, todėl branduolinė energetika yra realiausias būdas organiniam kurui taupyti.

Elektros energijos, pagamintos atominėje elektrinėje, savikaina mažesnė negu pagamintos šiluminėje elektrinėje.

Šiluminės elektrinės išmeta milžiniškus kiekius sieros junginių, anglies monoksido, azoto oksidų ir kitokių kenksmingų medžiagų, taigi labai teršia aplinką. Atominės elektrinės šiuo požiūriu mažiau kenksmingos aplinkai ir žmogui. Tačiau kelia grėsmę radioaktyviosios medžiagos, liekančios branduoliniame kure ir susidarančios aktyviojoje zonoje, ypač avarijos atveju. Todėl saugus atominių elektrinių darbas — svarbiausia, pasaulinės svarbos problema.



65.5 pav.

Pasaulio praktika rodo, kad ji išsprendžiama.

Lietuvos energetikos flagmanas

Ignalinos atominėje elektrinėje (AE) sumontuoti du reaktoriai po 1 mln kW galios. Kiekvienas reaktorius su dviem turbinomis ir dviem 500 000 kW generatoriais sudaro vieną AE bloką.

Atominėse elektrinėse maždaug tik trečdalis išsiskiriančios energijos virsta elektra; kitą energijos dalį išneša aušinantis vanduo. Ignalinos AE aušinančio vandens baseinas yra didžiausias Lietuvoje Drūkšių ežeras (49 km^2 ploto).

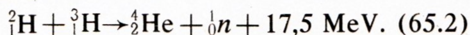
Per metus kiekvienas Ignalinos AE reaktorius suvartoja vos po kelis vagonus branduolinio kuro. Tokios galios šiluminei elektrinei per metus reikėtų bemaž 70 000 vagonų akmens anglies.

§ 65.4. Termobranduolinė energija

Žvaigždžių degimo lygtis

Branduolių dalijimosi reakcija — ne vienintelė, kurios metu išsiskiria atominė energija. Nagrinėdami atomų branduolių ryšio energiją (§ 64.3) sužinojome, kad susidarant branduoliui iš atskirų nukleonų turi išsiskirti energijos kiekis, lygus ryšio energijai. Išsiskiria energija ir jungiantis lengviems branduoliams į sunkesnį.

Reakcija, kurios metu du lengvi branduoliai susilieja į naują branduolį, vadinama **branduoline sintezės reakcija.** Pavyzdžiui, deuterio ir tričio sintezės į helį reakcija vyksta šitaip:



$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + 17{,}5\ MeV. \quad (65.2)$$

Kiekvienam reakcijoje dalyvaujančiam nukleonui tenka 17,5 MeV:5 = 3,5 MeV išsiskyrusios energijos. Palyginkime: dalijantis urano branduoliui išsiskiria apie 200 MeV energija, taigi vienam nukleonui jos tenka 200:236 = 0,8 MeV, t. y. per 4 kartus mažiau negu deuterio ir tričio sintezės reakcijoje.

Sintezės reakcijos sąlyga

Kad įvyktų sintezės reakcija, branduoliai turi suartėti iki tokio atstumo, kokiame pradeda veikti branduolinės jėgos, t. y. iki $2 \cdot 10^{-15}$ m. Branduolių suartėjimui priešinasi elektrostatinės stūmos jėgos, todėl branduoliai turi susidurti turėdami labai didelę kinetinę energiją. Tokią energiją jie įgyja tik nepaprastai aukštoje temperatūroje. Todėl branduolių sintezės reakcijos dar vadinamos **termobranduolinėmis reakcijomis.** Kad deuteris ir tritis jungtųsi į helį, jų mišinys turi įkaisti iki milijonų laipsnių. Tokia temperatūra Žemės sąlygomis susidaro tik sprogstant atominei bombai.

Gamtinės termobranduolinės reakcijos vyksta žvaigždžių gelmėse ir yra svarbiausias jų energijos šaltinis.

Vandenilinė bomba

Vandenilinė bomba (65.6 pav.) sudaryta iš atominės bombos (*1*) ir termobranduolinio užtaiso — vandenilio izotopų mišinio (*2*). Sprogus atominei bombai, susidaro sąlygos vandenilio izotopų sintezei.

Termobranduolinis užtaisas gali būti kiek norima didelis, todėl vandenilinių bombų sprogimo galia praktiškai neribota.

Nuo bombos prie termobranduolinės elektrinės

Jau keletas dešimtmečių viso pasaulio mokslininkai intensyviai ieško būdų valdomai termobranduolinei reakcijai vykdyti. Jai reikalinga aukšta temperatūra gali būti pasiekiama galinga elektros iškrova. Svarbiausia kliūtis, trukdanti įgyvendinti šią idėją, yra ta, kad dešimčių milijonų laipsnių temperatūroje staiga išgaruoja visos medžiagos. Todėl plazmą būtina bent dalį sekundės sulaikyti tam tikrame tūryje,

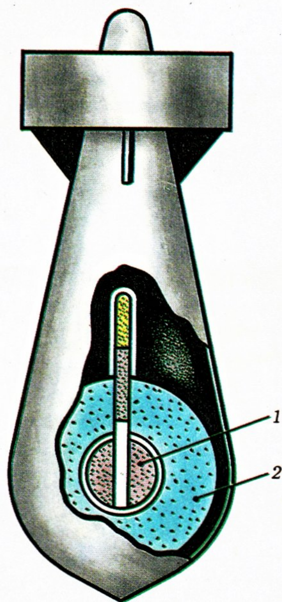
neleisti jai plėstis ir susiliesti su reaktoriaus sienelėmis. Sovietų Sąjungos mokslininkai Aleksandras S a c h a r o v a's ir Igoris T a m a s pasiūlė efektyvų būdą plazmai izoliuoti labai stipriais specialios konfigūracijos magnetiniais laukais. Ieškoma ir kitokių techninių sprendimų. Vienas iš jų — staigiai pakelti temperatūrą iki milijonų laipsnių mažose erdvės srityse trumpais galingais lazerio spindulio blyksniais. Tikimasi, kad termobranduoliniai reaktoriai bus sukurti jau netolimoje ateityje.

Vandenilio izotopų sintezės reakcijos taptų neišsenkamu energijos šaltiniu. Užtenka paminėti, kad susijungus deuteriui, esančiam viename litre paprasto vandens, išsiskirtų tiek pat energijos kaip sudeginus 350 l benzino.

? *1. 1933 m. branduolinės fizikos tėvas E. Rezerfordas, apibūdindamas branduolinės energetikos perspektyvas, pasakė: „Energija, išsiskirianti skylant atomui, nepaprastai maža. Kiekvienas, kas tikisi, kad šis procesas taps energijos šaltiniu, šneka niekus“.*
Koks fizikos atradimas atskleidė neribotas branduolinės energijos panaudojimo galimybes?

Pakartokite § 61.2.

Tema referatui: *„Ignalinos AE: energetika ir ekologija“.*



65.6 pav.

6.2 skyrius

KOSMINIAI SPINDULIAI IR ELEMENTARIOSIOS DALELĖS

66 paskaita

NELIESK ANTIMEDŽIAGOS!

§ 66.1. Kosminiai spinduliai

Nežemiškos kilmės spinduliai

Šveicarų fizikas A. G o k e l i s 1910 m. tyrė paslaptingas izoliuoto elektroskopo išsielektrinimo priežastis. Elektroskopas palaipsniui netekdavo savo krūvio net apgaubtas storu švino sluoksniu.

Aiškindamasis šio reiškinio aplinkybes, austrų fizikas Viktoras H e s a s aptiko nepaprastai skvarbius jonizuojančiuosius spindulius. Pradžioje galvota, kad jonizacijos šaltinis yra Žemės gelmių radioaktyvusis spinduliavimas. Tačiau paaiškėjo, kad kylant aukštyn atmosferos jonizacija didėja. Vadinasi, šie spinduliai — ne žemiškos, o kosminės kilmės. Todėl jie buvo pavadinti **kosminiais spinduliais.**

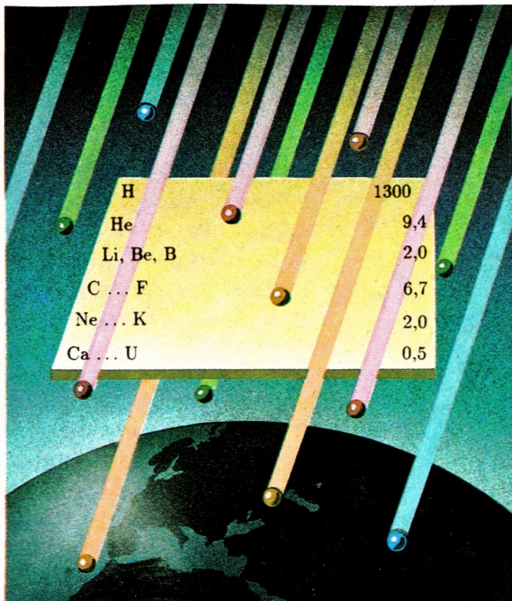
Kosminiai spinduliai atklysta į Žemę iš visų pusių, jų intensyvumas nepriklauso nuo Žemės sukimosi apie savo ašį.

Daug vertingų žinių apie kosminius

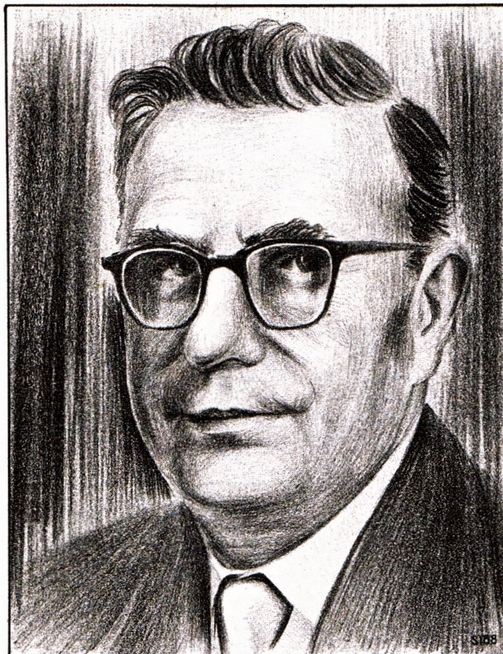
spindulius gaunama iš dirbtinių palydovų ir kosminių laivų.

Dvejopi kosminiai spinduliai

Tiriant kosminių spindulių sudėtį už Žemės atmosferos ribų, paaiškėjo, kad tai — nepaprastai didelės energijos dalelių srautas. Iš kosminių erdvių Žemę apšaudo vandenilio ir helio branduoliai, mažiau atlekia sunkesnių elementų branduolių bei elektronų. Vidutinis kosminių spindulių intensyvumas — maždaug 1300 dalelių į 1 m^2 kas sekundė (66.1 pav.). Dalelės atskrieja įvairiausiomis kryptimis šviesai artimais greičiais. Tai **pirminiai kosminiai spinduliai.** Jie lengvai „pramuša“ Žemės magnetinį šarvą (§ 38.2) ir įsiskverbia į viršutinius atmosferos sluoksnius. Ištirta, kad pirminių kosminių spindulių šaltiniai yra Saulė, kosminiai ūkai, sprogstančios žvaigždės supernovos ir kitos aktyviosios žvaigždės — kvazarai, pulsarai ir kt.



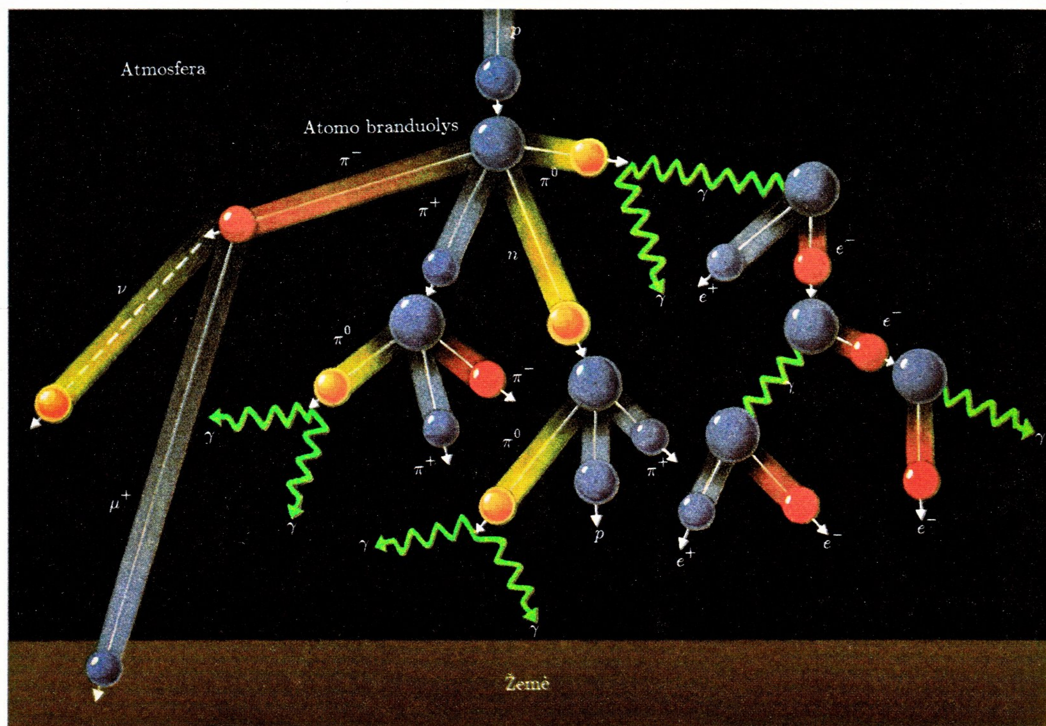
66.1 pav.



Kazimieras Baršauskas (1904—1964)

Pirminiai kosminiai spinduliai Žemės paviršiaus nepasiekia. Milžinišku greičiu susidūrę su atmosferos atomų branduoliais, jie sukelia įvairias branduolines reakcijas. Branduoliai skyla, atsiranda protonai, neutronai, įvairios kitos elementariosios dalelės ir γ kvantai. Visi šie branduolinių reakcijų produktai išsilaksto didžiuliais greičiais — tai **antriniai kosminiai spinduliai.** Jie turi pakankamai energijos naujoms branduolinėms reakcijoms sukelti. Procesui kartojantis gali susidaryti *antrinių kosminių spindulių liūtis* (66.2 pav.). Žemiau 20 km visi kosminiai spinduliai yra antriniai. Jų intensyvumas Žemės paviršiuje — maždaug 200 dalelių į 1 m^2 kas sekundė.

Kosminiai spinduliai registruojami ir tiriami Geigerio skaitikliais ir jonizacijos kameromis (§ 63.1). Šie įrenginiai statomi



66.2 pav.

aukštai kalnuose, lėktuvais ir balionais keliami į viršutinius atmosferos sluoksnius, skraidinami kosminiais aparatais.

Kodėl tiriami kosminiai spinduliai

Kosminiai spinduliai yra svarbus informacijos apie kosminius kūnus šaltinis. Be to, juose pasitaiko tokios energijos dalelių, kokios dar nepasiekiama net galingiausiais greitintuvais (10^{19}—10^{20} eV), todėl tik šioje „laboratorijoje" įmanoma stebėti kai kuriuos unikalius branduolių virsmus. Ilgą laiką kosminių spindulių stebėjimai buvo svarbiausias elementariųjų dalelių tyrimo metodas. Nors kosminių spindulių intensyvumas nedidelis, jie vis dėlto savaip paveikia gamtą ir žmogų.

Už kosminių spindulių atradimą V. H e s a s (1883—1964) 1936 m. apdovanotas Nobelio premija.

„Lituanica II" tiria kosminius spindulius

Lietuvoje kosminius spindulius pradėjo tirti 1933 m. Kauno Vytauto Didžiojo universitete Kazimieras B a r š a u s k a s, Antanas P u o d ž i u k y n a s ir jų mokiniai. Nuo 1936 m. šiems darbams buvo skirtas lėktuvas „LITUANICA II", kuriuo lakūnas Feliksas Vaitkus 1935 m. rugsėjo 21—22 d. pakartojo Stepono Dariaus ir Stasio Girėno skrydį per Atlantą.

§ 66.2. Elementariosios dalelės

Ar jos tikrai elementarios?

Elementariosiomis vadinamos mažiausios, nedalomos materijos dalelės. Fizikos istorijos pradžioje mažiausia ir nedaloma — elementaria — medžiagos dalele buvo laikomas atomas. Paaiškėjus sudėtingai atomo sandarai, elementariųjų dalelių vardas teko protonui, elektronui, neutronui. Tad elementariosios dalelės sąvoka kinta kaupiantis fizikos žinioms. O štai, pavyzdžiui, α dalelė — ne elementarioji, nes ji sudaryta iš dviejų protonų ir dviejų neutronų. Vėliau, tyrinėjant branduolines reakcijas, dalelių susidūrimus, buvo atrandamos vis naujos elementariosios dalelės, kurių dauguma nestabilios.

Svarbiausia elementariųjų dalelių savybė

Visuose procesuose elementariosios dalelės dalyvauja kaip nedalomi vienetai. Net susidūrus didelės energijos dalelėms jos nesutrupa į sudėtines dalis, bet virsta kitomis, žinomomis arba naujai atrandamomis elementariosiomis dalelėmis. Dalelių tarpusavio virsmai *apgręžiami:* jeigu, pavyzdžiui, kuri nors dalelė skyla į dvi daleles, tai iš tos dalelių poros gali susidaryti pradinė dalelė.

Kiekviena elementarioji dalelė gali virsti kita arba kitomis dalelėmis. Šie virsmai — kai kurių elementariųjų dalelių egzistavimo įrodymas. Kaip chemines reakcijas valdo elektronų ir jonų elektromagnetinė sąveika, o branduolines reakcijas — jau minėta stiprioji sąveika, taip dalelių virsmus valdo dar naujos rūšies sąveika, vadinama **silpnąja sąveika.** Taigi elementariosios dalelės sąveikauja per silpnosios sąveikos lauką. Šiandien mokslui žinomos keturių rūšių sąveikos, lemiančios visą begalinę vykstančių procesų įvairovę: gravitacinė, elektromagnetinė, stiprioji (branduolinė) ir silpnoji.

Elektrono dvynio atradimas

Pradėjus tirti kosminius spindulius, kaip iš gausybės rago pasipylė naujos elementariosios dalelės.

1932 m. JAV fizikas Karlas A n d e r s o n a s kosminiuose spinduliuose aptiko nežinomą teigiamą dalelę, kurios masė ir elektros krūvio absoliutinė vertė buvo tiksliai tokia pat kaip elektrono, bet krūvio ženklas — teigiamas. Andersonas šią dalelę pavadino **pozitronu,** t. y. teigiamu elektronu. Ją žymime e^+ arba β^+.

Magnetiniame arba elektriniame lauke pozitronas ir elektronas nukrypsta į priešingas puses.

Už pozitrono atradimą K. Andersonas 1936 m. (kartu su V. Hesu) apdovanotas Nobelio premija.

Energijos „vagišius" neutrinas

Vykstant β skilimui, neutronas išmeta elektroną ir virsta protonu. Tikslūs skaičiavimai parodė, kad šios reakcijos metu dingsta masė, maždaug pusantro karto didesnė už elektrono masę. Toks masės nuostolis yra ekvivalentus 780 000 eV energijai. Tačiau nei masės, nei energijos „vagišiaus" pėdsakų aptikti nepavyko. Kai kas ėmė net abejoti energijos tvermės dėsnio visuotinumu. Norėdamas tai paaiškinti, šveicarų fizikas Volfgangas P a u l i s 1930 m. paskelbė hipotezę, kad β skilimo metu, be elektrono, išlekia dar viena dalelė, neturinti nei krūvio, nei rimties masės. Toji dalelė ir nusineša trūkstamą energiją.

1933 m. Enrikas F e r m i s, remdamasis Paulio hipoteze, sukūrė β skilimo teoriją ir naująją dalelę pavadino **neutrinu** (it. „neutronukas"). Neutrinas žymimas simboliu ν arba $^0_0\nu$. Jis, kaip ir fotonas, egzistuoja tik skriedamas šviesos greičiu.

Neutrinas beveik nesąveikauja su aplinka, todėl jis nepaprastai skvarbus. Švine jis gali nueiti atstumą, lygų 50 šviesmečių!

Žemės rutulys, net ir Saulė jam skaidrūs, kaip stiklas šviesai. Todėl tik praėjus 26 metams po Paulio hipotezės paskelbimo 1956 m. JAV fizikai F. R e i n e s a s ir K. K o u e n a s sudėtingame įrenginyje užregistravo reakciją, kurioje dalyvavo neutrinas.

Pionų atradimas

1947 m. anglų fizikas Sesilis P a u e l a s, tyrinėdamas kosminių spindulių sukeltas reakcijas, aptiko daleles, kurių rimties masė maždaug 270 kartų didesnė už elektrono masę. Tos dalelės buvo pavadintos π **mezonais** arba **pionais.**

Pionų rasta trijų rūšių: teigiamų π^+, neigiamų π^- ir neutralių π^0.

Keičiantis π mezonais vyksta nuolatinė nukleonų sąveika branduolyje: protonai atiduoda neutronams teigiamus π^+ mezonus ir virsta neutronais, o pastarieji, absorbuodami π^+ mezonus, virsta protonais. Analogiškai nukleonai sąveikauja keisdamiesi neigiamais π^- mezonais. Taigi π mezonai yra branduolinio lauko kvantai, panašiai kaip fotonai — elektromagnetinio lauko kvantai.

Elektringųjų pionų gyvavimo trukmė vienoda ir lygi $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ s, neutraliojo — vos apie 10^{-16} s.

Už naujų elementariųjų dalelių π mezonų atradimą S. Pauelas 1950 m. apdovanotas Nobelio premija.

§ 66.3. Elementariųjų dalelių klasifikacija

Keturios dalelių grupės

Šiandien žinomos 4 stabilios elementariosios dalelės (fotonas, elektronas, protonas ir neutrinas), per tris dešimtis palyginti ilgaamžių — gyvuojančių ilgiau kaip 10^{-17} s — dalelių, o itin trumpai (10^{-22}—10^{-23} s) gyvuojančių dalelių jau atrasta per du šimtus. Atsižvelgiant į rimties masę ir kitas savybes, dalelės skirstomos į keturias grupes (66.1 lentelė):

1. **Fotonas** — dalelė, kurios rimties masė ir krūvis lygūs nuliui. Pirmoje grupėje tik ši dalelė ir yra.

2. **Leptonai** (gr. *leptos* — lengvas) — lengvosios dalelės. Jų žinoma aštuonios. Tik vieno iš leptonų — μ mezono — masė beveik 207 kartus didesnė už elektrono masę. Vis dėlto jis priskiriamas šiai grupei todėl, kad, kaip ir kiti leptonai, nesąveikauja stipriąja sąveika.

3. **Mezonai** (gr. *mesos* — vidutinis) — tai dalelės, kurių masė svyruoja nuo 260 iki 1100 elektrono masių. Lengvesnieji mezonai vadinami π mezonais, o sunkesnieji — *K* mezonais, arba kaonais. Visi mezonai nestabilūs, jų gyvavimo trukmė nuo 10^{-6} iki 10^{-19} s. 1977 m. atrasti supersunkieji mezonai, vadinami ipsilonais.

4. **Barionai** (gr. *barys* — sunkus) — sunkiųjų dalelių grupė. Pati gausiausia. Be jau žinomų protonų ir neutronų, šiai grupei priklauso hiperonai (hiperprotonai) — nestabilios dalelės, žymiai sunkesnės už protonus. Joms skylant susidaro nukleonai.

Priešakinė fizikos linija

Kuo didesnę energiją turi trenkiančios viena į kitą įgreitintos greitintuve dalelės, tuo didesnės energijos (kartu ir masės) „lekia žiežirbos“ — gimsta naujos dalelės. Todėl tikimasi, kad ir toliau bus atrandama vis sunkesnių naujų dalelių.

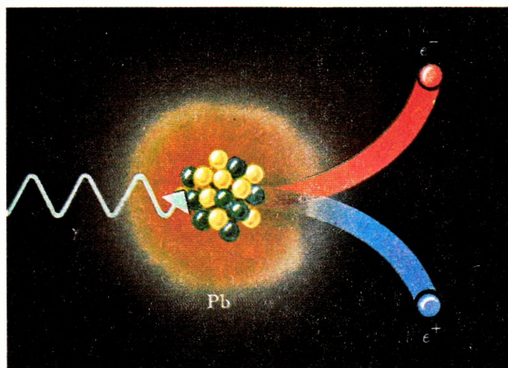
Elementariųjų dalelių pasaulis, kaip matome, turi daugybę gyventojų, stebina virsmų ir kitų procesų įvairove. Tik ar neklystame vadindami šias daleles elementariosiomis? Be abejo, dalelių virsmai, dviejų ir daugiau dalelių atsiradimas iš vienos rodo, kad sąvoka „elementariosios“ — tik tradicinė. Dar daugiau: nuo 1964 m. imta kalbėti, kad dalelės, vadina-

66.1 l e n t e l ė. **Elementariosios dalelės**

	Dalelių pavadinimas	Simbolis		Masė (elektrono masėmis)	Elektros krūvis	Gyvavimo trukmė s
		dalelės	antidalelės			
	Fotonas	γ	γ	0	0	stabilus
Leptonai	Elektroninis neutrinas	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	stabilus
	Miu mezoninis neutrinas	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	stabilus
	Elektronas	e^-	e^+	1	-1	stabilus
	Miu mezonas	μ^-	μ^+	206,7	-1	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
Mezonai	Pi mezonai	π^0	$\bar{\pi}^0$	264,1	0	$0{,}8 \cdot 10^{-16}$
		π^+	π^-	273,1	1	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$
	Ka mezonai	K^+	K^-	966,4	1	$1{,}23 \cdot 10^{-8}$
		K^0	$\bar{K}^0$	974,1	0	K_s^0—$0{,}86 \cdot 10^{-10}$
						K_L^0—$5{,}38 \cdot 10^{-8}$
	Eta nulis mezonas	η^0	η^0	1074	0	10^{-17}
Barionai	Protonas	p	$\bar{p}$	1836,1	1	stabilus
	Neutronas	n	$\bar{n}$	1838,6	0	10^3
	Liambda hiperonas	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2184,1	0	$2{,}5 \cdot 10^{-10}$
	Sigma hiperonai	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1	$0{,}8 \cdot 10^{-10}$
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	10^{-14}
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1	$1{,}49 \cdot 10^{-10}$
	Ksi hiperonai	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	$3{,}03 \cdot 10^{-10}$
		Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1	$1{,}66 \cdot 10^{-10}$
	Omega minus hiperonas	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1	$1{,}3 \cdot 10^{-10}$

mos elementariosiomis, sudarytos iš kur kas mažesnio skaičiaus dar „elementaresnių" dalelių, pavadintų **kvarkais.** Kvarkų hipotezė „sudėliojo" pradžioje vos iš trijų kvarkų ir antikvarkų daugumą žinomų dalelių, numatė naujas daleles, kurios vėliau buvo atrastos. Šiandien ja lyg ir niekas neabejoja, nors kvarkų skaičių teko padidinti. Kvarkai — neregėtų savybių vaiduokliai: jų elektros krūvis lygus 1/3 arba 2/3 elementariojo krūvio, ir jų iš principo neįmanoma aptikti laisvų. Kvarkų tarpusavio sąveika tokia stipri, kad niekada jie neištrūksta iš grupės, sudarančios vieną ar kitą dalelę. O dalelių virsmai — tai tiesiog kvarkų ar antikvarkų perėjimai, dėl kurių susidaro naujos jų kombinacijos.

Elementariųjų dalelių fizika — „karštoji" fizikos mokslo sritis. Ji audringai vystosi. Šiandien dar daug čia spręstinų problemų, tarp kurių bene svarbiausia — vieningos sąveikų teorijos kūrimas. Mikropasaulio tyrinėtojai gvildena esmingiausias materijos savybes. Ar yra „elementarusis ilgis" — nedalomas atstumo kvantas, „elementarioji trukmė" — nedalomas laiko šuoliukas? Tai pavyzdžiai tų svarbių klausimų, į kuriuos turi atsakyti ateities mokslas.



66.3 pav.

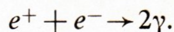
Dalelės ir jų „dvynės“

66.1 lentelėje visas elementariąsias daleles, išskyrus keletą, atitinka **antidalelės.** Dalelių ir antidalelių rimties masė, gyvavimo trukmė ir kai kurios kitos charakteristikos vienodos, o krūviai — vienodo dydžio, bet priešingų ženklų.

Visos elektringos elementariosios dalelės egzistuoja poromis: dalelė — antidalelė. Tačiau dalelės ir antidalelės porai egzistuoti elektros krūvis nebūtinas, antidaleles turi ir neutronas bei neutrinas.

Materijos formų kaita

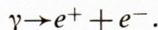
Antidalelės („priešiškosios dalelės“) taip pavadintos dėl to, kad bet kuri dalelė, susidūrusi su savo antidalele, **anihiliuoja,** t. y. abi dalelės „susinaikina“, virsdamos lauko kvantais. Pavyzdžiui, susidūrus lėtiems elektronui ir pozitronui, jie virsta dviem fotonais, kiekvienas po 0,5 MeV energijos:



$$e^{+}+e^{-}\rightarrow 2\gamma .$$

Anihiliacijos metu išsiskiria 1000 kartų daugiau energijos negu dalijantis urano branduoliui.

Gamtoje gali vykti ir atvirkščias virsmas — tam tikromis sąlygomis didelės energijos γ kvantai gali virsti medžiagos dalelėmis. Vilsono kameroje nufotografuotas elektrono ir pozitrono poros gimimas iš γ kvanto, patekusio į stiprų švino branduolio lauką (66.3 pav.):



$$\gamma\rightarrow e^{+}+e^{-}.$$

Žinoma ir daugiau tokių virsmų pavyzdžių.

Visi šie virsmai patvirtina teiginį, kad *materija egzistuoja medžiagos ir lauko forma; bet kurios formos materija gali virsti kitos formos materija.*

Antimedžiaga — ateities energijos šaltinis?

Atradus antidaleles paaiškėjo, kad gali egzistuoti ir iš jų susidaryti **antimedžiagos** atomai. Pavyzdžiui, antiprotonas ir apie jį skriejantis pozitronas sudarys *antivandenilio* atomą. Gauti antimedžiagą nepaprastai sunku, nes susilietusi su medžiaga ji kaipmat anihiliuoja. Taigi mūsų planetoje nėra prasmės ieškoti antimedžiagos. Manoma, jog Visatoje gali būti ne tik antimedžiagos, bet ir iš jos sudarytų antipasaulių. Galima spėti, kad antimedžiagai būdingos ir kitos neįprastos savybės.

Ar sugebės kada nors žmonija panaudoti anihiliacijos energiją, šiandien sunku numatyti.

?

1. *Paaiškinkite nukleonų sąveiką branduolyje keičiantis neigiamais* π^{-} *mezonais.*
2. *Kaip atomo branduolys veikia pozitroną?*
3. *Kodėl § 66.4, aiškinant dalelių ir antidalelių anihiliaciją, žodis „susinaikina“ parašytas kabutėse?*
4. *Paaiškinkite 66.2 paveiksle parodytą antrinių kosminių spindulių susidarymo procesą. Parodykite, kuriose kosminių spindulių liūties vietose fotonai virsta rimties masę turinčiomis dalelėmis ir atvirkščiai.*

Tema referatui: *„Elementariųjų dalelių pasaulis“.*

7 dalis
ASTROFIZIKA

7.1 skyrius
VISATOS SANDARA

67 paskaita
SAULĖS ŠEIMA FIZIKOS ŠVIESOJE

„...lietuviai atiduoda aukas savo bjauriems dievams Perkūnui, tai yra griausmui, Žvaigždikui ir Saulei, kad ji šviestų žemei“.

Kryžiuočių kronika, 1261 m.

§ 67.1. Ką tiria astrofizika

Astrofizika (gr. *astron* — žvaigždė) — tai *mokslas apie dangaus kūnų fizines savybes, juose vykstančius fizinius procesus, jų kilmę ir evoliuciją.*

Šios jaunos mokslo šakos istorija prasidėjo antroje XIX a. pusėje, atradus fotografiją ir spektrinę analizę. Jos tyrimo objektai — planetos (gr. *planetes* — klajoklė), Saulė, Žvaigždės ir tarpžvaigždinių erdvių medžiaga. Daugiausia žinių apie jų sandarą, cheminę sudėtį, temperatūrą ir kt. atneša įvairūs jų skleidžiami spinduliai. Žemės atmosferos sugeriamiems spinduliams tirti panaudojami aukštai iškylantys balionai, raketos ir dirbtiniai Žemės palydovai.

Kosminius reiškinius, susijusius su greičiais, artimais šviesos greičiui, ir su kosminiais kūnais, kurių medžiagos tankis ypač didelis (tai neutroninės žvaigždės, juodosios skylės, baltosios nykštukės), tiria *reliatyvistinė astrofizika.*

§ 67.2. Saulė ir Saulės sistema

Saulė — artimiausia žvaigždė

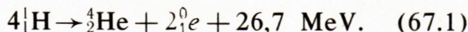
Nuo žilos senovės lietuviai pažino daugelį dangaus kūnų, o ryškiausius jų suasmenino, susiejo su dievybėmis ir garbino (67.1 pav.). Iš visų indoeuropiečių lietuviai daugiausia turi savų liaudiškų pavadinimų dangaus kūnams bei reiškiniams įvardyti. Bene anksčiausiai pradėta garbinti Saulė. Daugumа senovės lietuvių švenčių susijusios su Saulės kultu, jo atgarsiai atėjo ir į krikščioniškųjų švenčių tradicijas.

Astronomams Saulė — tai žvaigždė, esanti arčiausiai Žemės, vidutiniškai apie 150 mln. km atstumu. *Astrofizikos šaka, tirianti Saulės sandarą, jos atmosferoje ir gelmėse vykstančius reiškinius bei jų įtaką Žemei, vadinama Saulės fizika, arba* **heliofizika.** Saulė — nevienalytis dujų plazmos



67.1 pav. Lietuviai garbina Saulę, Mėnulį, žvaigždes, ugnį, žaltį. Raižinys iš viduramžių knygos

rutulys, apsisukantis apie savo ašį per 25 Žemės paras. Ji daugiau nei 300 000 kartų masyvesnė už Žemę. Saulėje aptikta per 70 įvairių elementų, daugiausia lengvųjų: vandenilio (70% Saulės masės), helio (28% masės) ir kt. Saulės energijos šaltinis yra jos gelmėse vykstančios termobranduolinės reakcijos — vandenilio branduolių virsmas helio branduoliais:



$$4\,^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow \,^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,^{0}_{1}e + 26{,}7\ \mathrm{MeV}. \quad (67.1)$$

1 kg vandenilio virtus heliu, išsiskiria tiek energijos, kiek sudeginus 12 000 tonų anglies. Saulės paviršiaus temperatūra — apie 6000 °C, o gelmėse ji siekia 14 mln. °C.

Kiek metų švies Saulė?

Iš Saulės į tarpplanetinę erdvę srūva Saulės vėjas (§ 38.2), sklinda radijo bangos, infraraudonieji, regimieji, ultravioletiniai ir Rentgeno spinduliai. Saulės paviršius spinduliuoja 60 000 kW iš 1 m^2 ploto, o visa Saulės spinduliavimo galia — $4 \cdot 10^{23}$ kW. Taip spinduliuodama Saulė netenka 4,5 mln. t masės per sekundę.

Kadangi Saulės masė lygi $2 \cdot 10^{30}$ kg, o vandeniliui tenka maždaug 70% masės, tai, ir toliau taip spinduliuojant energiją, vandenilio užteks dar 8—10 mlrd. metų. Lietuvoje kvadratinis metras žemės paviršiaus per metus gauna apie $3{,}5 \cdot 10^{9}$ J Saulės energijos.

Visų kitų rūšių energija (išskyrus atominę) — tai taip pat pakeitusi pavidalą Saulės energija. Štai kodėl Saulė — močiutė, gyvybės Žemėje šaltinis.

Didelę įtaką Žemei, ypač jos atmosferai, daro Saulės paviršiuje — jos atmosferoje — vykstantys procesai. Joje tai atsiranda, tai nyksta dėmės (žemesnės temperatūros sritys) ir žibintai (aukštesnės temperatūros sritys), plyksteli galingi žybsniai, iškyla milžiniški plazmos stulpai, vadinami protuberantais. Kuo aktyviau vyksta tie procesai, tuo daugiau atlekia iš Saulės elektringų dalelių ir trumpabangių spindulių, tuo daugiau sutrikdomi Žemės atmosferoje vykstantys procesai.

Saulės tyrimai Lietuvoje

Vilniaus astronomijos observatorija, įkurta 1753 m. — ketvirtoji Europoje, buvo vienas iš astrofizikos lopšių (67.2 pav.). 1864 m. joje buvo įrengtas antrasis pasaulyje (po Didžiosios Britanijos) fotoheliografas ir suorganizuota pirmoji pasaulyje nuolatinė fotografinė Saulės tarnyba. Saulės tyrimai plačiai išgarsino Vilniaus observatoriją. Pasisemti patyrimo, kaip fotografinį metodą taikyti astronominiams tyrimams, į Vilnių atvykdavo astronomai iš Vakarų Europos. 1868—1876 m. gauta apie 900 Saulės



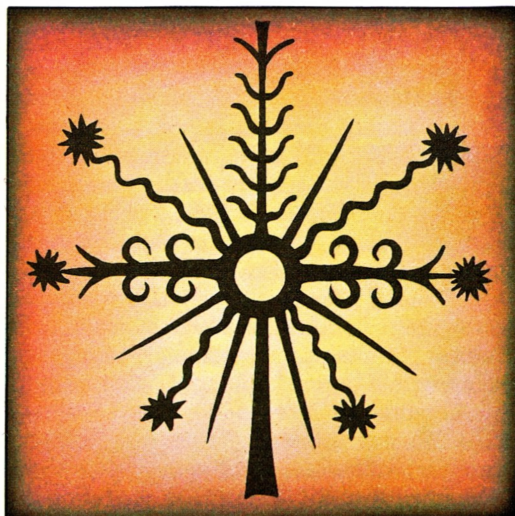
67.2 pav. Senoji Vilniaus observatorija

67.3 pav.

fotografijų, kurios tebesaugomos Vilniaus ir Pulkovo observatorijose.

Saulės šeima

Apie Saulę skrieja devynios planetos su savo palydovais, taip pat daug mažyčių planetėlių, vadinamų asteroidais, ir kometų. Tai — Saulės sistema. Pagal atstumą nuo Saulės planetos išsidėsčiusios šia tvarka: Merkurijus (Vaivora), Venera (Aušrinė), Žemė, Marsas (Žiezdrė), Jupiteris (Indraja), Saturnas (Sėlija), Uranas, Neptūnas ir Plutonas (67.1 lent. ir 67.3 pav.). Gal esama ir tolimesnių už Plutoną planetų, kurių iki šiol dar neatrasta. Vyriškus savo dievų vardus davė planetoms romėnai. Lietuvių tautosakoje visos planetos — Saulės dukros, vadintos moteriškais vardais. Tai rodo, kad lietuviškieji vardai duoti dar matriarchato laikais. Saulės šeimos simboli-



67.4 pav.

67.1 l e n t e l ė. **Fizikinės sąlygos Saulės sistemos kūnuose**

	Atstumas nuo Saulės 10^6 km	Skersmuo Žemės skersmenimis	Masė Žemės masėmis	Palydovų skaičius	Tankis 10^3 $\frac{kg}{m^3}$	Vidutinė paviršiaus temperatūra °C	g m/s^2
Saulė	—	109	330000		1,4	6000	274
Merkurijus	58	0,38	0,06	—	5,6	285	3,6
Venera	108	0,95	0,82	—	5,2	470	8,6
Žemė	150	1	1	1	5,5	15	9,8
Marsas	228	0,53	0,11	2	4	−55	3,7
Jupiteris	778	11,2	318	16	1,3	−145	24
Saturnas	1426	9,5	95,1	17	0,7	−180	11
Uranas	2869	3,9	14,5	5	1,5	−220	8,4
Neptūnas	4496	3,9	17,3	2	1,7	−235	11
Plutonas	5929	0,3	0,002	1	1,5	−240	0,5

kos gausu lietuvių liaudies mene (67.4 pav.), ji gyvena pasakose ir sakmėse. Šalia Kaldinių astronomijos observatorijos (netoli Molėtų) restauruotoje XIX a. aukštaičių sodyboje kuriamas pirmasis pasaulyje etnokosmologijos muziejus. Jame kaupiami eksponatai, rodantys lietuvių tautos ryšį su Visata: liaudies menas, tautosaka, buities daiktai ir matavimo prietaisai.

Fizikiniai Saulės ir planetų duomenys pateikti 67.1 lentelėje.

§ 67.3. Mėnulis

Saulė močiutė, Mėnuo tėvelis

Mūsų tautosakoje Mėnulis dažnai vaizduojamas kaip Saulės vyras, siejamas su derlingumu, vaisingumu, sveikata.

Jis, beje, tik Žemės palydovas, skriejantis apie Žemę 384 400 km spindulio orbita ir visada į ją atgręžęs tą pačią pusę. Jis apskrieja apie Žemę per 27,3 paros. Jo skersmuo — apie 3500 km, masė — 0,012 Žemės masės. Tamsesnės dėmės, matomos Mėnulio paviršiuje ir nuo seno vadinamos jūromis — tai žemumos, apsuptos kalnų grandinių. Didžiausi kalnagūbriai pavadinti Žemės kalnynų vardais: Kaukazas, Alpės ir kt. Daugybė meteoritų kraterių, nuo didžiulių iki mažuliukų. Mėnulyje nėra vandens. Jis neturi ir atmosferos, kuri sulaikytų pavojingus gyvybei kosminius spindulius, Rentgeno ir ultravioletinius Saulės spindulius, saugotų paviršių nuo meteoritų. Mėnulyje net dieną juodas dangus, juodi šešėliai. Mėnulio diena ir naktis trunka po dvi savaites, todėl temperatūra apšviestoje pusėje pakyla iki +120 °C, o naktinėje pusėje nukrinta iki −170 °C.

Laisvojo kritimo pagreitis Mėnulyje tik 1,6 m/s^2.

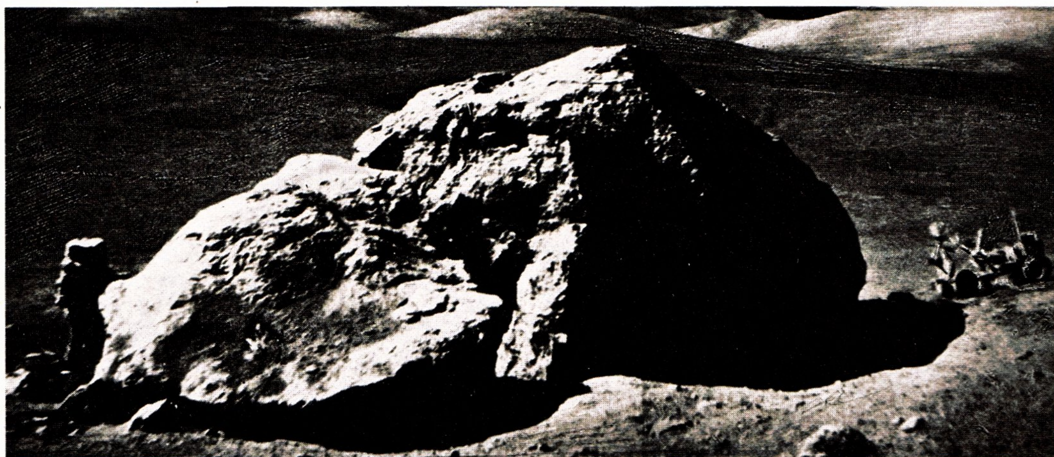
Žmogaus pėdos Mėnulyje

1959 m. tarybinė kosminė stotis „Luna-3“ praskriejo netoli Mėnulio ir pirmąkart nufotografavo nematomą Mėnulio pusę.

1969—1972 m. iš kosminių laivų „Apolonas“ Mėnulyje buvo išsilaipinusios šešios JAV astronautų ekspedicijos. Pirmasis žengęs ant Mėnulio žmogus — amerikietis Nylas A r m s t r o n g a s (gim. 1930 m.).

Astronautai vaikščiojo po Mėnulį ir važinėjo specialiu visureigiu, fotografavo (67.5 pav.), matavo temperatūrą, parvežė apie 300 kg Mėnulio grunto pavyzdžių.

1970—1973 m. Mėnulio paviršių tyrė ir TSRS savaeigiai radijo bangomis valdomi aparatai „Lunochod“. Aparatai nuvažiavo



67.5 pav. Mėnulyje

Mėnulio paviršiumi dešimtis kilometrų, perdavė į Žemę Mėnulio vaizdus, tyrė grunto mechanines savybes ir cheminę sudėtį. Mėnulio grunto pavyzdžiai pasirodė labai panašūs į Žemės kalnų uolienas, tačiau turėjo ir vien Mėnulio mineralams būdingų savybių. Nustačius Mėnulio uolienų amžių, paaiškėjo, kad Mėnulis yra susidaręs tuo pačiu laiku kaip ir Žemė — maždaug prieš 4 mlrd. metų.

§ 67.4. Saulės sistemos planetos

Astrofizikos šaka, tirianti planetų ir jų palydovų sandarą, kilmę, evoliuciją, fizikines ir chemines savybes, vadinama **planetų** *fizika, arba* **planetologija.**

Visų planetų masė sudaro vos 0,1% Saulės masės. Visos jos skrieja apie Saulę beveik vienoje plokštumoje ir sukasi apie savo ašis.

Žemės grupės planetos

Keturios arčiausiai Saulės esančios planetos vadinamos *Žemės grupės planetomis.* Jos labiau už kitas ištirtos. Palyginti su tolimesnėmis planetomis, visos šios grupės planetos yra mažos, bet gana didelio tankio (apie $5 \cdot 10^3$ kg/m^3), turi kietą paviršių.

Keleivių globėjo planeta

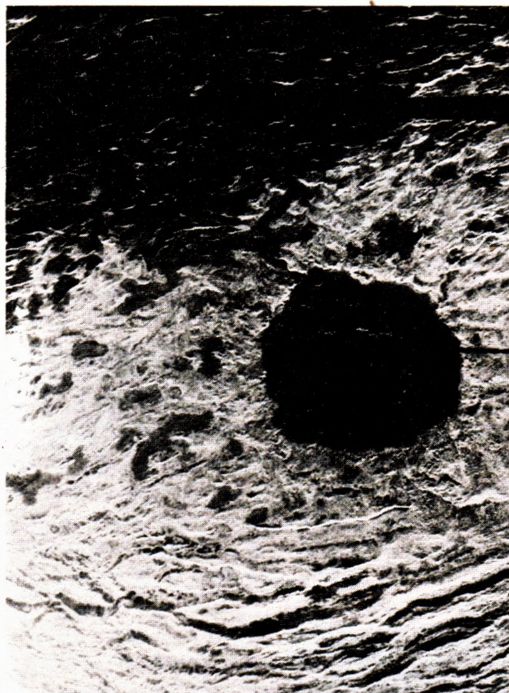
Arčiausia Saulės skrieja mažiausioji Žemės grupės planeta **Merkurijus.** (Merkurijus — romėnų prekybos dievas ir keliautojų globėjas.) Žiūrint iš Žemės, Merkurijus nenutolsta nuo Saulės daugiau kaip 28°, dėl to jis matomas ne ilgiau kaip valandą prieš Saulei tekant ir nusileidus.

1974 m. JAV kosminė stotis „Mariner 10“ praskriejo pro Merkurijų 720 km atstumu nuo paviršiaus, padarė kelis šimtus fotografijų ir radijo bangomis perdavė jas į Žemę. Merkurijaus paviršius, tankiai išbadytas krateriais ir išraižytas stačiomis pakopomis, labai panašus į Mėnulio paviršių.

Aušrinė ir Vakarinė

Antroji pagal nuotolį nuo Saulės ir artimiausia Žemei planeta — **Venera** (Venera — romėnų grožio ir meilės deivė). Žiūrint iš

Žemės, Venera nutolsta nuo Saulės ne didesniu kaip 47° kampu, todėl ji pateka tik maždaug 3 valandos prieš Saulei tekant (Aušrinė) ir tiek pat vėliau už ją nusileidžia (Vakarinė). Naktį ši planeta niekuomet nematoma. Venera turi labai tankią stipriai Saulės šviesą atspindinčią atmosferą, kurioje yra 96% anglies dioksido, 3,5% azoto ir kitų dujų. Tai po Saulės ir Mėnulio ryškiausias šviesulys. Veneros atmosfera tokia tanki, kad paviršiuje jos slėgis 90 kartų didesnis negu Žemėje. Paviršius, supamas atmosferos ir ištisos baltų debesų dangos, buvo astronomams mįslė iki pat nusileidžiant kosminiams aparatams. Veneros atmosferą ir paviršių tyrė Sovietų Sąjungos kosminiai aparatai „Venera" ir JAV automatinės tarpplanetinės stotys „Mariner" ir „Pionier-Venera". Nusileidę ant planetos, aparatai gręžė ir analizavo gruntą, tyrė atmosferą, atsiuntė paviršiaus atvaizdų (67.6 pav.). Visa Venera yra karšta sausa dykuma, smėlis ir akmenys. Temperatūra Veneros paviršiuje 470—480 °C. Skirtumas tarp dienos ir nakties temperatūros vos 1—2 °C. Tokią aukštą temperatūrą Veneroje lemia dvi priežastys: viena — ji yra 40 mln. km arčiau Saulės negu Žemė, antra — stiprus šiltnamio efektas, kurį sukelia tanki ir nelaidi šiluminiams spinduliams Veneros atmosfera.



67.6 pav. 2,5 km gylio meteoritinės kilmės krateris Veneroje

Karo dievo planeta

Marsas — didžiausią susidomėjimą keliantis Žemės kaimynas, dėl rausvos spalvos pavadintas romėnų karo dievo vardu. Maždaug kas 15 metų Marsas ir Žemė suartėja iki mažiausio 55 mln. km atstumo — įvyksta **didžioji opozicija.** Paskutinė tokia opozicija buvo 1988 m. Opozicijos metu pro teleskopą gerai matomos baltos Marso ašigalių kepurės iš ledo ir sušalusio anglies dioksido. Planetos paviršiuje daug kraterių, kalnagūbrių, gilių griovų. Matomos ilgos vingiuotos įdubos, panašios į išdžiūvusių upių vagas.

Didžiųjų opozicijų metas palankus ir kosminėms stotims leisti į Marsą. SSSR ir JAV kosminės stotys „Mars" ir „Viking" 1971—1979 m. nuleido ant Marso paviršiaus aparatus, kurie tyrė planetos atmosferą, analizavo gruntą, siuntė į Žemę Marso paviršiaus (67.7 pav.) ir jo palydovų vaizdus.

Kai kurios Marso paviršiaus nuotraukos sukėlė sensaciją: jose gana aiškiai matomi žmogaus veidą primenantys iškilimai. „Skulptūrų" aukštis siekia 300 m., o ilgis 1500 m. Už keliolikos kilometrų nuo šių „sfinksų" stūkso taisyklingų piramidžių kompleksai, primenantys Meksikos piramides.



67.7 pav. Marse

Marso atmosfera labai išretėjusi, jos slėgis 170 kartų mažesnis negu Žemėje. Daugiausia joje anglies dioksido (95 %), yra azoto (3 %), šiek tiek deguonies ir vandens garų. Pusiaujo srityse Marso paviršius vidudienį įšyla iki 5—10 °C, o naktį ataušta iki —80 °C. Marse siaučia dažni ir stiprūs vėjai, kurie pakelia į atmosferą daugybę smėlio ir dulkių.

Jokių gyvybės požymių Marse nerasta.

Tolimosios planetos milžinės

Keturios tolimesnės planetos **Jupiteris, Saturnas, Uranas** ir **Neptūnas** savo mase ir ypač tūriu labai pralenkia Žemės grupės planetas. Jos sudaro **planetų milžinių** grupę. Paskutinė šiandien žinoma **Plutonio** planeta gimininga didžiųjų planetų palydovams. Jupiterio masė 318 kartų, o tūris net 1400 kartų didesnis už Žemės. Visos planetos milžinės yra nedidelio tankio, turi storas debesuotas atmosferas, jų sudėtyje daugiausia lengvųjų elementų.

Jupiteris ir Saturnas matomi plika akimi, todėl žinomi nuo senovės. Opozicijų metu šios planetos spindi danguje kaip skaisčios žvaigždės. Apie Jupiterį ir Saturną skrieja spiečiai palydovų: Jupiteris jų turi 16, o Saturnas — 17. Keturis ryškiausius Jupiterio palydovus atrado dar Galilėjus 1610 m.

Įspūdingas reiškinys Saulės sistemoje yra taip pat Galilėjaus pastebėtas *Saturno žiedas*. Tai vos kelių šimtų metrų storio ir 250 000 km pločio žiedas, juosiantis planetą pusiaujo plokštumoje. 1981 m. pro Saturną praskriejęs „Vojadžer-2" (JAV) ištyrė žiedo dydį, sandarą ir perdavė į Žemę televizijos vaizdų. Saturno žiedas sudarytas iš įvairaus dydžio ledo dalelių.

1781 m. anglų astronomas ir fizikas Frederikas Heršelis atrado teleskopu septintą planetą ir pavadino ją Uranu. Šios ir sekančios planetos atradimai stebina tuo, kad pirmiausia jos buvo atrastos ne danguje, o... sąsiuvinyje sprendžiant uždavinį: ieškant dangaus kūno, kuris nukreipė nuo numatyto kelio jau žinomas planetas.

1846 m. prancūzų matematikas Urbenas Leverjė kreipėsi į žymų to meto astronomą Johaną Gotfrydą Galę tokiu laišku: „Nukreipkite teleskopą į Vandenio

žvaigždyną, į ekliptikos tašką, kurio ilguma 326°, ir ne didesniu, kaip 1° nuotoliu nuo tos vietos rasite naują planetą". Tą pačią naktį nurodytoje vietoje Galė atrado Neptūną.

Tolimųjų planetų vardai taip pat mitiniai: romėnų Jupiteris, kaip ir lietuvių Perkūnas — galingiausias dievas; Saturnas — žemdirbystės, Uranas — dangaus, Neptūnas — jūrų dievas, Plutonas — požemio pasaulio dievas.

?

1. Kiek masės nustoja Saulė spinduliuodama per metus?
2. Išvardykite Žemės grupės planetas.
3. Kodėl Uranas ir Neptūnas neturi lietuviškų liaudiškų pavadinimų?
4. Kokį žymų fizikos (optikos srities) atradimą yra padaręs Urano atradėjas F. Heršelis?
5. Išanalizuokite 67.1 lentelę ir paaiškinkite, kodėl gravitacinis pagreitis Jupiteryje daugiau kaip du kartus didesnis negu Žemėje, nors Jupiterio tankis 4 kartus mažesnis.

67.1. Žemės tūrį galime apskaičiuoti gana tiksliai, laikydami ją 6400 km spindulio rutuliu. Koks yra vidutinis Žemės tankis, jeigu jos masė $6 \cdot 10^{24}$ kg?

67.2. Saulės masė 333 000 kartų didesnė už Žemės masę, o spindulys 109 kartus ilgesnis už Žemės spindulį. Apskaičiuokite vidutinį Saulės tankį, reikiamus duomenis imdami iš ankstesnio uždavinio.

Pakartokite: § 54.1, 54.4.

Temos referatams: *„Fantastika ir tikrovė apie Marsą ir jo palydovus", „Vilniaus astronomijos observatorija".*

---

68 paskaita

KUR VEDA PAUKŠČIŲ TAKAS?

„Gyventoiey Žiemaytcziu,
Lietwos, Kurszu, Prusu,
Pažinst Žinklus Danginius,
ant Pasaula musu"

Dionizas P o š k a (1757—1830)

§ 68.1. Mūsų žvaigždžių sistema — Galaktika

Ar galima suskaičiuoti žvaigždes?

Mūsų Saulė — viena iš daugybės Visatos saulių-žvaigždžių, mirgančių nakties danguje. Žvaigždės, kaip ir Saulė, yra didelės masės įkaitusios plazmos kamuoliai, spinduliuojantys elektromagnetines bangas ir elektringąsias daleles. Tamsią giedrą naktį plika akimi danguje matoma apie 2500 žvaigždžių, o stebint pro teleskopus jų priskaičiuojama milijardai. Atstumai iki žvaigždžių tokie milžiniški, kad jų šviesa keliauja iki mūsų keletą ar keliolika metų — iš artimiausiųjų ir tūkstančius metų — iš tolimųjų. Todėl dažniausiai vartojamas vienetas tiems atstumams išreikšti ir yra **šviesmetis** (šm) — atstumas, kurį šviesa nusklinda per metus.

Kaip rasti Šiaurės žvaigždę?

Jau žiloje senovėje žmonės atsitiktiniame žvaigždžių išsibarstyme įžvelgė žmonių, žvėrių, gyvulių, paukščių, daiktų kontūrus ir jų vardais pavadino žvaigždžių grupes. Pavyzdžiui, 68.1 paveiksle matome Didžiųjų Grįžulo Ratų žvaigždyną, daugelyje tautų vadinamą Didžiąja Meška (būtinai išmokite jį rasti, nes netoli jo, ten, kur parodyta paveiksle, yra Šiaurės žvaigždė).

Ilgainiui visame danguje buvo pripiešta įvairių figūrų — žvaigždynų. Daug žvaigždynų pavadinimų susiję su graikų mitologija (pavyzdžiui: Heraklis, Pegasas, Centauras, Feniksas). Visas dangus tarptautiniu astronomų susitarimu padalintas į 88 žvaigždynus. Ryškiausi dangaus Šiaurės pusrutulio žvaigždynai yra Didieji Grįžulo Ratai, Vežėjas, Slibinas, Dvyniai, Erelis, Gulbė, Lyra, Andromeda ir Kasiopėja (68.2 pav.).

Kiekviename žvaigždyne žvaigždės žymimos graikiškomis raidėmis: pati šviesiausia žvaigždė — α, antra pagal šviesumą — β



68.1 pav.

ir t. t. Pavyzdžiui, Šiaurinė žvaigždė yra Mažųjų Grįžulo Ratų α, o šviesiausia dangaus žvaigždė Sirijus (Lietuvoje matoma tik žiemą) — Didžiojo Šuns α.

Ar lemtingi Zodiako ženklai?

Eilė žvaigždynų, esančių išilgai kelio, kuriuo vyksta matomasis metinis Saulės judėjimas, vadinami **Zodiako juosta** (gr. *zōdiakos* — gyvūnas). Kiekviename Zodiako žvaigždyne Saulė būna maždaug mėnesį (68.1 lent.).

Senovėje tikėta, kad Zodiako žvaigždynai turi mistinės galios lemti įvykius Žemėje. Pasak Livonijos kronikininko Rivijaus, pagoniškoje Vilniaus šventykloje, pastatytoje 1285 metais, būta 12 laiptų su aukurais. Kiekvienas laiptas buvo skirtas vis kitam Zodiako žvaigždynui. Kai Saulė įžengdavo į tą žvaigždyną, ant jam skirto laipto buvo kūrenama ugnis ir aukojamos aukos.

Saulės judėjimas Zodiako ratu — tariamas reiškinys, atspindintis Žemės skriejimą apie Saulę.

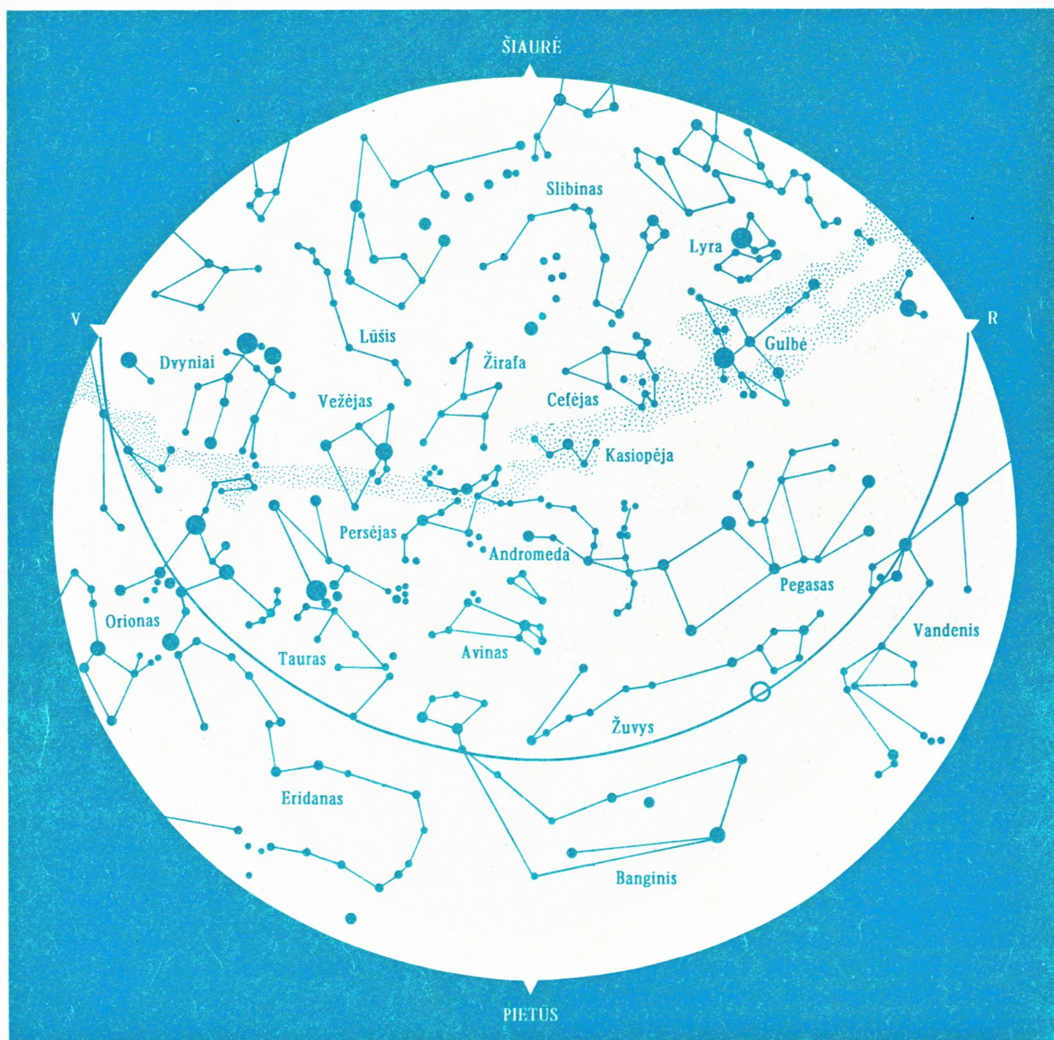
O kas gi yra patys žvaigždynai — niekuo nesusietų žvaigždžių, net labai tolimų, atsitiktinis išsidėstymas regėjimo lauke ar iš tiesų jų telkiniai? Dažniausiai teisingas pirmasis atsakymas, nors ne visada. Pavyzdžiui, Sietynas (Plejadas) yra žvaigždžių telkinys, vadinamas žvaigždžių spiečiumi.

Visatos gigantai Galaktikos

Visatos erdvėse žvaigždės pasiskirsčiusios netolygiai. Be jau minėtų spiečių, jos sudaro milžiniškas įvairios formos sankaupas — **galaktikas.** Galaktikoje (rašomoje iš didžiosios raidės), kuriai priklauso mūsų Saulė, yra daugiau kaip 100 milijardų žvaigždžių. Galaktikos centrą sudaro apie 16 000 šm skersmens branduolys; nuo jo spiralėmis

68.1 lentelė. **Saulės judėjimas Zodiako žvaigždynais**

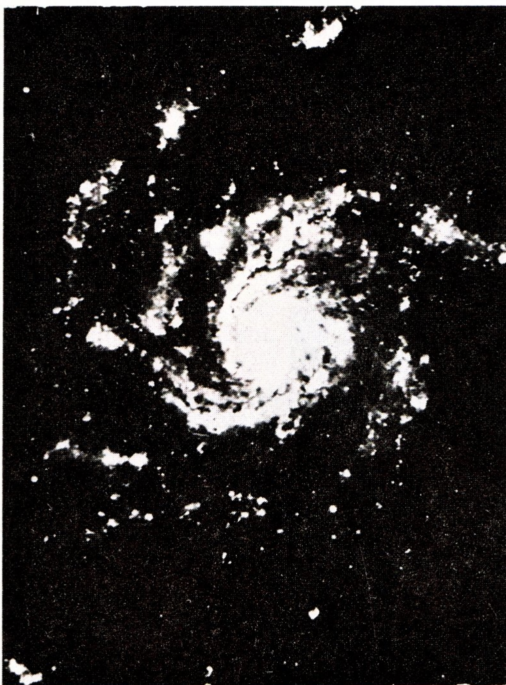
Žvaigždynas	Saulės judėjimo laikas	Zodiako ženklas
Vandenis	I.21—II.20	♒
Žuvys	II.21—III.20	♓
Avinas	III.21—IV.20	♈
Tauras	IV.21—V.21	♉
Dvyniai	V.22—VI.21	♊
Vėžys	VI.22—VII.22	♋
Liūtas	VII.23—VIII.22	♌
Mergelė	VIII.23—IX.22	♍
Svarstyklės	IX.23—X.23	♎
Skorpionas	X.24—XI.22	♏
Šaulys	XI.23—XII.21	♐
Ožiaragis	XII.22—I.20	♑



68.2 pav.

driekiasi beveik vienoje plokštumoje kelios atšakos. Branduolys su spiralėmis sudaro 80 000 šm skersmens plonėjantį į kraštus diską. Abipus disko yra šimtai tūkstančių paskirų žvaigždžių, tarsi pabirusių iš besisukančio Galaktikos disko. Saulė yra toli nuo Galaktikos branduolio, vienoje iš spiralių. Nuo Galaktikos centro Saulė nutolusi 26 000 šm. Visa Galaktika sukasi apie savo centrą, ir kartą apsisuka per maždaug 200 mln. metų.

Gyvendami Galaktikos viduje, mes





68.3 pav. Spiralinė galaktika, matoma iš viršaus ir iš šono

negalime pažvelgti į ją iš šalies, todėl nežinome tiksliai jos formos, spiralių išsidėstymo. Tačiau žinome, kad ji labai panaši į artimiausią mums galaktiką, švytinčią Andromedos žvaigždyne ir vadinamą **Andromedos Ūku** ir kitas spiralines galaktikas (68.3 pav.).

Kur veda Paukščių Takas

Giedrą naktį, pažvelgę Galaktikos centro kryptimi, matome dangaus skliautu nusidriekusią šviesią juostą — **Paukščių Taką** (68.2 pav.). Tai Galaktikos disko projekcija dangaus skliaute. Paukščių Takas susideda iš daugelio silpnai šviečiančių žvaigždžių, jų spiečių ir šviesių ūkų. Kai kuriose vietose jų šviesą užstoja tamsieji ūkai. Lietuvoje Paukščių Takas geriausiai matomas ankstyvą rudenį. Daugelis paukščių šia kryptimi skrenda žiemoti į šiltuosius kraštus.

Paukščių Tako ir kitų Galaktikos objektų fizines savybes tiria ir Lietuvos astrofizikai[1].

Supergalaktikos ir Metagalaktika

Visatoje yra daugybė kitų galaktikų, tarp jų — galaktikos milžinės ir galaktikos nykštukės, mažesnės už pirmąsias tūkstančius kartų. Kai kurios galaktikos itin stipriai spinduliuoja radijo bangas ir Rentgeno spindulius. Ypač domina mokslininkus paslaptingieji kvazarai — tolimiausi iš rastų lig šiolei objektų, spinduliuojantys taip

[1] Plačiau apie Galaktiką galite paskaityti populiarioje knygoje: Vytautas Straižys. Paukščių Takas (V.: Mokslas, 1992).

intensyviai, kad to negalima paaiškinti jokiu žinomu energijos šaltiniu, netgi termobranduolinėmis reakcijomis. Galaktikos, savo ruožtu, buriasi į didesnes ar mažesnes grupes, o kartais ir į labai didelius, po keletą tūkstančių galaktikų spiečius, vadinamus **supergalaktikomis.** Supergalaktikos sukasi apie savo sistemos centrą.

Visi galaktikų spiečiai ir paskiros galaktikos, visa, ką tik aprėpia danguje galingiausi pasaulio teleskopai, vadinama **Metagalaktika.** Šiandien nežinoma Metagalaktikos ribų, nes jos priklauso nuo astronominių stebėjimų technikos skvarbumo. Šiuo metu Metagalaktiką įmanoma stebėti iki 10^{10} šm atstumo. Tačiau nėra pagrindo manyti, kad Metagalaktika — tai jau visa Visata, visas egzistuojantis materialus pasaulis.

Galaktikų spektrų linijos yra paslinkusios link spektro ilgabangio galo. Šis *raudonasis poslinkis* (§ 54.4) rodo, kad visos galaktikos tolsta ir sklaidosi — *Metagalaktika plečiasi.*

§ 68.2. Žvaigždžių fizika

Žvaigždės milžinės ir nykštukės

Žvaigždžių pasaulis labai įvairus: jos skiriasi dydžiu, mase ir tankiu, temperatūra ir vykstančiais procesais. Yra žvaigždžių milžinių, kurių skersmuo tūkstančius kartų didesnis už Saulės skersmenį (68.4 pav., *a*). Tokios žvaigždės viduje tilptų ne tik Žemės, bet ir Marso, Jupiterio, Saturno orbitos. Saulė tarp žvaigždžių laikytina nykštuke. Tačiau yra ir už Saulę, net už Žemę mažesnių žvaigždžių — subnykštukių (68.4 pav., *b*).

Ar karšta žvaigždė Saulė?

Žvaigždžių spalva susijusi su jų paviršiaus temperatūra. Pačios „šalčiausios“ žvaigždės danguje skiriasi savo raudonu atspalviu — jų temperatūra „vos“ 2—3 tūkst. laipsnių. Pereinant nuo raudonųjų žvaigždžių prie oranžinių, po to prie geltonųjų, baltųjų ir žydrųjų, temperatūra vis didėja. Geltonųjų žvaigždžių, prie kurių priskiriama ir mūsų Saulė, paviršiaus temperatūra 5—6 tūkst. laipsnių, o baltųjų — apie 10 tūkst. Karščiausios yra žydrosios žvaigždės: jų paviršiaus temperatūra — 30 tūkst. laipsnių ir aukštesnė. Žvaigždžių gelmėse temperatūra gali būti 10 mln. laipsnių.

Žvaigždžių tankis

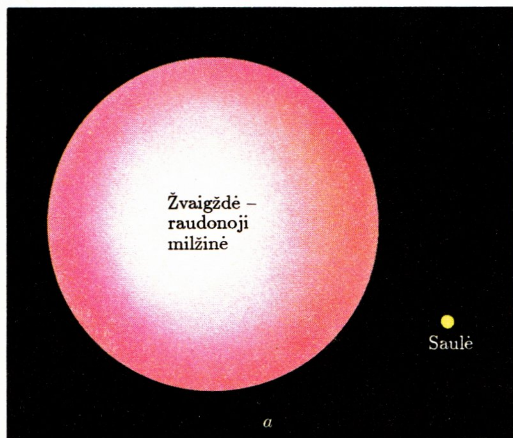
Žvaigždžių masės taip pat įvairios, bet skiriasi anaiptol ne taip smarkiai kaip tūriai: maždaug nuo kelių dešimčių Saulės masių iki kelių šimtųjų Saulės masės dalių. Tai reiškia, kad labai plačiose ribose kinta žvaigždžių tankis. Mažiausio tankio yra raudonosios milžinės — gigantiškos palyginti šaltos žvaigždės iš labai praretėjusių dujų. Jų vidutinis tankis tūkstančius kartų mažesnis už oro tankį. O, štai, dešimtis kartų mažesnių už Saulę raudonųjų nykštukių tankis jau kelis kartus viršija švino tankį. Dar mažesnių už raudonąsias nykštukes, bet labai karštų baltųjų nykštukių tankis milžiniškas: vieno kubinio centimetro šių žvaigždžių medžiagos masė matuojama šimtais tonų.

Žvaigždės iš vienų neutronų

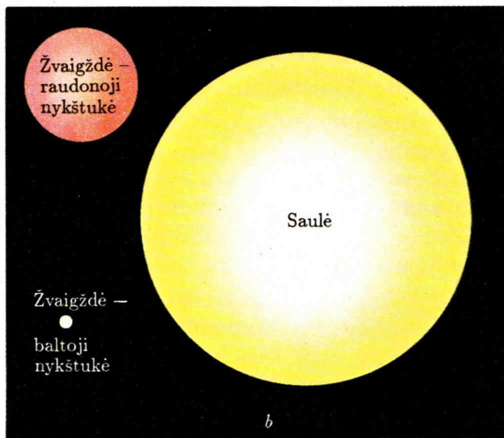
Dar didesnio tankio tik 1942 m. atrastos **neutroninės žvaigždės.** Jų tankį sunku įsivaizduoti: kubinio centimetro tokios žvaigždės medžiagos masė — milijonas tonų! Neutroninės žvaigždės skersmuo — tik keli ar kelios dešimtys kilometrų, o masė prilygsta Saulės masei. Neutroninės žvaigždės branduolys sudarytas iš suspaustų vienas prie kito neutronų. Dėl mažo neutroninių žvaigždžių paviršiaus ploto neįmanoma pastebėti jų šviesos; šios žvaigždės aptinkamos pagal jų Rentgeno arba radijo spinduliavimą.

Kaip miršta žvaigždės

Kuo aukštesnė žvaigždės temperatūra, tuo sparčiau jos gelmėse „sudega“ vandenilis.



a



b

68.4 pav.

virsdamas heliu. Žydrosios žvaigždės išeikvoja vandenilį per 10^6—10^7 metų, o tokios kaip Saulė — tik per 10^{10} metų.

Išdegus kurui sutrinka žvaigždę veikusių jėgų pusiausvyra: sumažėjęs auštančių dujų slėgis jau negali atsverti gravitacijos jėgų traukos į centrą, ir žvaigždė pradeda katastrofiškai trauktis. Kuo didesnė žvaigždės masė, tuo didesnė ją spaudžianti gravitacijos jėga. Mažesnės masės žvaigždės, iki 10 Saulės masių, susitraukusios tampa baltosiomis nykštukėmis, nuo 10 iki 30 Saulės masių žvaigždės — neutroninėmis žvaigždėmis, o pačios didžiausios žvaigždės, kurių masė viršija 30 Saulės masių,— **juodosiomis skylėmis.**

Juodosios dangaus kiaurymės

Besitraukiant didelės masės žvaigždėms, jų tankis pasiekia tokią ribą, kai nelieka jėgų, galinčių atsverti vis didėjančias gravitacijos jėgas. Gravitacija tiek padidėja, kad viską įtraukia į žvaigždę — ir elementariąsias daleles, ir fotonus. Tokie kūnai nustoja spinduliavę daleles ar bangas. Jie daugiau nevadinami žvaigždėmis, nes iš jų negali išsiveržti net šviesa. Dar daugiau: šie Visatos objektai įsiurbia į save patekusią į jų traukos lauką aplinkos medžiagą ir elektromagnetines bangas. Tokios erdvės sritys ir vadinamos juodosiomis skylėmis. Juodosios skylės nematomos, tačiau krintanti į jas medžiaga skleidžia Rentgeno ir gama spindulius; pagal tai jos ir aptinkamos.

Už žvaigždžių sandaros ir evoliucijos tyrimus indų kilmės JAV fizikas Subramanjanas Čandrasekaras 1983 m. apdovanotas Nobelio premija.

§ 68.3. Kosmologija

Visatos dėsnis

Astrofizikos šaka, tirianti Visatos objektų kilmę ir raidą, vadinama **kosmologija.** Ypač svarbus kosmologijai buvo jau minėtas galaktikų sklaidymosi faktas, atrastas 1929 m. amerikiečių astronomo Edvino Hablio. Hablis nustatė, kad *visos galaktikos tolsta vienos nuo kitų, ir tuo didesniu greičiu, kuo didesnis tarp jų atstumas.* Kitaip tariant, galaktikų tolimo greitis v tiesiog proporcingas atstumui tarp jų R:

$$v = HR. \qquad (68.1)$$

Koeficientas H šioje formulėje vadinamas **Hablio konstanta**; $H = 0{,}023\ \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{šm}}$. Hablio konstanta rodo, kiek padidėja galaktikų greitis, atstumui tarp jų padidėjus vienu šviesmečiu. Remiantis Hablio dėsniu nustatomas atstumas iki tolimųjų galaktikų.

Įdomu, kad pačios galaktikos su savo žvaigždėmis ir planetomis nesiplečia.

Koks Visatos amžius?

Jeigu Visata plečiasi, tai prieš tam tikrą laiką visi jos objektai turėjo būti nepaprastai arti vienas kito. Teoriškai — viename taške, kurio tankis begalinis. Tokį tašką astronomai pavadino **singuliariniu tašku** (lot. *singularis* — ypatingas). Singuliariniam taškui netinka mums žinomi fizikos dėsniai. Tokia materijos būsena mūsų protui nesuvokiama.

Žinant galaktikų sklaidymosi greičius, galima apskaičiuoti, kada prasidėjo Visatos plėtimasis. Maždaug prieš dvidešimt milijardų metų visa Visatos materija buvo susitelkusi singuliariniame taške, kuriam sprogus prasidėjo Visatos evoliucija.

Už *didžiojo sprogimo hipotezę* byloja stebėjimai.

Didžiojo sprogimo aidas

1965 m. JAV radiofizikai Robertas Vilsonas ir Arnas Penzijas, tobulindami kosminius ryšius, aptiko iš visų pusių vienodai sklindantį 7,3 cm bangos ilgio *foninį kosminį radijo spinduliavimą.* Šis spinduliavimas nesusijęs su jokiais dangaus kūnais, jo priežastis negali būti kuris nors žinomas fizikinis procesas. Tačiau šis atradimas nuostabiai gerai derinosi su didžiojo sprogimo hipoteze — jį jau seniau buvo teoriškai numatę astrofizikai. Taip turėjo spinduliuoti atsiradusi po sprogimo medžiaga, iš kurios dar nebuvo susidariusios žvaigždės ir galaktikos. Per dvidešimt milijardų metų spinduliai plėtėsi kartu su besiplečiančia Metagalaktika ir, pasklidę lygiai į visas puses, tebeklajoja Visatos erdvėje. Atrastasis spinduliavimas buvo pavadintas **reliktiniu** (lot. *relictus* — paliktas). Reliktiniai spinduliai sklinda iš visų dangaus pusių, o ne iš vienos — sprogimo — pusės todėl, kad jie daugybę kartų keitė kryptį, atsispindėdami nuo elementariųjų dalelių, ir tokiu būdu tolygiai pasiskirstė po visą erdvę. Reliktinės radijo bangos mus pasiekia tarsi prieš milijardus metų įvykusio sprogimo aidas. Jų atradimas buvo svarus argumentas, patvirtinantis didžiojo sprogimo ir Visatos plėtimosi hipotezę.

Už reliktinio spinduliavimo atradimą R. Vilsonas ir A. Penzijas 1978 m. apdovanoti Nobelio premija.

Kas buvo prieš didįjį sprogimą?

Kas buvo iki didžiojo sprogimo? Ar Visatai lemta vien plėstis ir išsisklaidyti iki begalybės, ar plėtimąsi turi pakeisti traukimasis — Visata pulsuoja? Atsakymų į šiuos klausimus mokslas dar nežino. Priartėjusi iki „Visatos pradžios“, šiandien astrofizika pasiekė pažinimo horizontą. Tačiau, kaip ir žemiškasis horizontas, ši riba priartėjus nutolsta, ir atsiskleidžia vis naujos pažinimo erdvės.

Į daugelį klausimų apie Visatos istoriją ir ateitį atsakys būsimi astrofizikos tyrimai. O mes įsitikinome, kad *Visata yra neišsemiama savo įvairove ir kitimu, savo forma ir turiniu.*

?

1. 68.1. paveiksle parodyta, kaip rasti Šiaurės žvaigždę. Kaip pagal šią žvaigždę nustatyti pasaulio šalis?

2. Senosios Vilniaus astronomijos observatorijos sieną puošia mįslingi bareljefai (67.2 pav.). Ką jie galėtų reikšti?

3. Kokiu greičiu galaktika 3c295 tolsta nuo mūsų Galaktikos, jeigu atstumas iki jos $5 \cdot 10^9$ šm?

4. Kiek metų dar turėtų šviesti Saulė?

5. Ką vadiname Visata?

1 priedas

TARPTAUTINĖS SISTEMOS (SI) VIENETAI

Dydžio pavadinimas	Matavimo vienetas ir jo santrumpa	Nesisteminių matavimo vienetų ryšys su SI vienetais
Pagrindiniai vienetai		
Ilgis	metras (m)	1 centimetras (cm) = $= 10^{-2}$ m 1 kilometras (km) = $= 10^{3}$ m
Masė	kilogramas (kg)	1 gramas (g) = 10^{-3} kg 1 tona (t) = 10^{3} kg 1 centneris (cnt) = $= 10^{2}$ kg
Laikas	sekundė (s)	1 minutė (min) = = 60 s 1 valanda (h) = = 3600 s
Elektros srovės stiprumas	amperas (A)	
Termodinaminė temperatūra	kelvinas (K)	1 Celsijaus laipsnis (1 °C) = 1 K $T = t + 273{,}15$
Šviesos stiprumas	kandela (cd)	1 tarptautinė žvakė = = 1,005 cd
Medžiagos kiekis	molis (mol)	
Papildomieji vienetai		
Plokščiasis kampas	radianas (rad)	1 laipsnis (°) = $\frac{\pi}{180}$ rad 1 minutė (′) = $\frac{\pi}{108} \times 10^{-2}$ rad 1 sekundė (″) = $= \frac{\pi}{648} \times 10^{-3}$ rad
Erdvinis kampas	steradianas (sr)	

Tęsinys

Dydžio pavadinimas	Matavimo vienetas ir jo santrumpa	Nesisteminių matavimo vienetų ryšys su SI vienetais
Išvestiniai vienetai		
Mechaninių dydžių vienetai		
Plotas	kvadratinis metras (m^2)	1 kvadratinis centimetras (cm^2) = 10^{-4} m^2
Tūris	kubinis metras (m^3)	1 kubinis centimetras (cm^3) = 10^{-6} m^3 1 litras (l) = $= 1{,}000028 \cdot 10^{-3}$ m^3
Tankis	kilogramas kubiniam metrui ($\frac{kg}{m^3}$)	1 gramas kubiniam centimetrui ($\frac{g}{cm^3}$) = $= 10^{3}$ $\frac{kg}{m^3}$
Greitis	metras per sekundę ($\frac{m}{s}$)	1 centimetras per sekundę ($\frac{cm}{s}$) = 10^{-2} $\frac{m}{s}$ 1 kilometras per valandą ($\frac{km}{h}$) = $\frac{1}{3{,}6}$ $\frac{m}{s}$
Pagreitis	metras sekundei kvadratu ($\frac{m}{s^2}$)	1 centimetras sekundei kvadratu ($\frac{cm}{s^2}$) = $= 10^{-2}$ $\frac{m}{s^2}$.
Jėga	niutonas (N)	1 jėgos kilogramas (kgf) = 9,80665 N
Darbas, energija	džaulis (J)	1 kilogramometras (kgf · m) = 9,80665 J
Galia	vatas (W)	1 kilogramometras per sekundę ($\frac{kgf \cdot m}{s}$) = = 9,80665 W 1 arklio galia (AG) = 735,499 W

Tęsinys

Dydžio pavadinimas	Matavimo vienetas ir jo santrumpa	Nesisteminių matavimo vienetų ryšys su SI vienetais
Slėgis	paskalis (Pa)	1 techninė atmosfera (at) = 98066,5 Pa 1 fizinė atmosfera (atm) = 101325 Pa
Kampinis greitis	radianas per sekundę ($\frac{rad}{s}$)	
Dažnis	hercas (Hz)	

Šiluminių dydžių vienetai

Šilumos kiekis	džaulis (J)	1 kalorija (cal) = = 4,1868 J 1 kilokalorija (kcal) = 4186,8 J
Temperatūros kitimo specifinė šiluma	džaulis kilogramui ir kelvinui ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	1 kilokalorija kilogramui ir laipsniui ($\frac{kcal}{kg \cdot {}^\circ C}$) = 4186,8 $\frac{J}{kg \cdot K}$
Fazinio virsmo specifinė šiluma	džaulis kilogramui ($\frac{J}{kg}$)	1 kilokalorija kilogramui ($\frac{kcal}{kg}$) = 4186,8 $\frac{J}{kg}$

Elektrinių ir optinių dydžių vienetai

Elektros kiekis (krūvis)	kulonas (C), arba ampersekundė (A · s)	
Elektrinio lauko stiprumas	voltas metrui ($\frac{V}{m}$)	
Įtampa, elektrovaros jėga	voltas (V)	

Tęsinys

Dydžio pavadinimas	Matavimo vienetas ir jo santrumpa	Nesisteminių matavimo vienetų ryšys su SI vienetais
Elektrinė talpa	faradas (F)	1 cm = $\frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$ F
Elektrinis laidumas	simensas (S)	
Elektrinė varža	omas (Ω)	
Darbas ir energija	džaulis (J)	1 kW · h = 36 · 10^6 J 1 eV = 1,60207 × × 10^{-19} J
Galia	vatas (W)	1 AG = 735,499 W
Magnetinis srautas	vėberis (Wb)	1 maksvelas (Mx) = = 10^{-8} Wb
Magnetinė indukcija	tesla (T), arba vėberis kvadratiniam metrui ($\frac{Wb}{m^2}$)	1 gausas (Gs) = = 10^{-4} T
Magnetinio lauko stiprumas	amperas metrui ($\frac{A}{m}$)	1 erstedas (Oe) = = $\frac{10^3}{4\pi}$ $\frac{A}{m}$
Induktyvumas	henris (H)	1 centimetras (cm) = = 10^{-9} H
Šviesos srautas	liumenas (lm)	
Apšviestumas	liuksas (lx)	

Radiacijos dydžių vienetai

Radioaktyvaus preparato aktyvumas	bekerelis (Bq)	1 rezerfordas (Rd) = = 10^6 Bq
Radiacijos dozė	grėjus (Gy)	

2 priedas
FIZIKINIŲ DYDŽIŲ LENTELĖS

1. Kai kurių medžiagų tankiai

Medžiaga	ϱ kg/m³	Medžiaga	ϱ kg/m³
Kietosios medžiagos 293 K temperatūroje			
Akmens anglis	$1{,}4 \cdot 10^3$	Platina	$2{,}15 \cdot 10^4$
Alavas	$7{,}3 \cdot 10^3$	Plyta	$1{,}8 \cdot 10^3$
Aliuminis	$2{,}7 \cdot 10^3$	Plienas	$7{,}8 \cdot 10^3$
Auksas	$1{,}93 \cdot 10^4$	Porcelianas	$2{,}3 \cdot 10^3$
Cinkas	$7{,}1 \cdot 10^3$	Sidabras	$1{,}05 \cdot 10^4$
Deimantas	$3{,}5 \cdot 10^3$	Stiklas	$2{,}5 \cdot 10^3$
Ebonitas	$1{,}2 \cdot 10^3$	Švinas	$1{,}14 \cdot 10^4$
Geležis	$7{,}8 \cdot 10^3$	Uranas	$1{,}87 \cdot 10^4$
Grafitas	$5{,}32 \cdot 10^3$	Valgomoji druska	$2{,}1 \cdot 10^3$
Kamštis	$2{,}4 \cdot 10^2$	Vario sulfatas	$2{,}2 \cdot 10^3$
Ketus	$7{,}4 \cdot 10^3$	Varis	$8{,}9 \cdot 10^3$
Ledas (0 °C)	$0{,}9 \cdot 10^3$	Volframas	$1{,}93 \cdot 10^4$
Manganinas	$8{,}5 \cdot 10^3$	Vudo lydinys	$9{,}7 \cdot 10^3$
Nichromas	$8{,}3 \cdot 10^3$	Žalvaris	$8{,}5 \cdot 10^3$
Nikelinas	$8{,}8 \cdot 10^3$	Žėrutis	$2{,}8 \cdot 10^3$
Nikelis	$8{,}9 \cdot 10^3$		

Skysčiai 293 K temperatūroje

Medžiaga	ϱ kg/m³
Anilinas	$1{,}02 \cdot 10^3$
Alyvų aliejus	$9{,}2 \cdot 10^2$
Benzinas	$7{,}0 \cdot 10^2$
Benzolas	$9 \cdot 10^2$
Etilo eteris	$7{,}1 \cdot 10^2$
Etilo spiritas	$7{,}9 \cdot 10^2$
Gyvsidabris 0 °C	$1{,}36 \cdot 10^4$
Glicerinas	$1{,}26 \cdot 10^3$
Mineralinė alyva	$9{,}2 \cdot 10^2$
Nitrobenzolas	$1{,}2 \cdot 10^3$
Terpentinas	$8{,}7 \cdot 10^2$
Nafta	$(8—9) \cdot 10^2$
Vanduo 277 K	$1{,}0 \cdot 10^3$
Vanduo sunkusis 284,23 K temperatūroje (kai tankis didžiausias)	$1{,}106 \cdot 10^3$
Vario sulfato tirpalas, sotus	$1{,}15 \cdot 10^3$
Žibalas	$8{,}0 \cdot 10^2$

Medžiaga	ϱ kg/m³	Medžiaga	ϱ kg/m³
Dujos normaliosiomis sąlygomis $p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Pa, $T_0 = 273$ K			
Acetilenas	1,17	Kriptonas	3,74
Amoniakas	0,77	Ksenonas	5,85
Angliarūgštės dujos	1,98	Metanas	0,72
Argonas	1,78	Neonas	0,90
Azotas	1,25	Oras	1,29
Deguonis	1,43	Šviečiamosios dujos	0,73
Helis	0,18	Vandenilis	0,09

II. Kai kurių medžiagų specifinės šilumos

Medžiaga	c J/(kg·K)	Medžiaga	c J/(kg·K)
Kietosios medžiagos			
Alavas	$2{,}5 \cdot 10^2$	Naftalinas	$1{,}3 \cdot 10^3$
Aliuminis	$9{,}2 \cdot 10^2$	Parafinas	$3{,}2 \cdot 10^3$
Auksas	$1{,}25 \cdot 10^2$	Platina	$1{,}25 \cdot 10^2$
Betonas	$8{,}8 \cdot 10^2$	Plyta	$7{,}5 \cdot 10^2$
Cementas	$8{,}0 \cdot 10^2$	Sidabras	$2{,}5 \cdot 10^2$
Cinkas	$4{,}0 \cdot 10^2$	Siera	$7{,}12 \cdot 10^2$
Geležis, plienas	$4{,}6 \cdot 10^2$	Smėlis	$9{,}7 \cdot 10^2$
Ketus	$5{,}5 \cdot 10^2$	Stiklas	$8{,}4 \cdot 10^2$
Ledas	$2{,}09 \cdot 10^3$	Švinas	$1{,}2 \cdot 10^2$
Medis	$2{,}7 \cdot 10^3$	Varis	$3{,}8 \cdot 10^2$
		Žalvaris	$3{,}8 \cdot 10^2$
Skysčiai			
Etilo eteris	$2{,}33 \cdot 10^3$	Mašininė alyva	$2{,}1 \cdot 10^3$
Etilo spiritas	$2{,}43 \cdot 10^3$	Transformatorinė alyva	$2{,}093 \cdot 10^3$
Geležis	$8{,}3 \cdot 10^2$	Vanduo	$4{,}187 \cdot 10^3$
Gyvsidabris	$1{,}25 \cdot 10^2$	Žibalas	$2{,}14 \cdot 10^3$
Glicerinas	$2{,}43 \cdot 10^3$		

Tęsinys

Medžiaga	c J/(kg·K)	Medžiaga	c J/(kg·K)
D u j o s (nekintant slėgiui)			
Amoniakas	$2{,}1 \cdot 10^3$	Helis	$5{,}2 \cdot 10^3$
Angliarūgštės dujos	$8{,}3 \cdot 10^2$	Oras ($\mu_0 = 29$ kg/kmol)	$1{,}0 \cdot 10^3$
Azotas	$1{,}0 \cdot 10^3$	Vandenilis	$1{,}43 \cdot 10^4$
Deguonis	$9{,}2 \cdot 10^2$	Vandens garai	$2{,}2 \cdot 10^3$

III. Kai kurių rūšių kuro degimo šiluma

Medžiaga	q J/kg	Medžiaga	q J/kg
K i e t a s i s k u r a s			
Akmens anglis: markės A-I	$2{,}05 \cdot 10^7$	Malkos sausos, šiaudai	$8{,}3 \cdot 10^6$
markės A-II	$3{,}03 \cdot 10^7$	Medžio anglis	$2{,}97 \cdot 10^7$

Tęsinys

Medžiaga	q J/kg	Medžiaga	q J/kg
Durpės	$1{,}5 \cdot 10^7$	Rudoji anglis	$9{,}3 \cdot 10^6$
Koksas	$3{,}03 \cdot 10^7$	Parakas	$3{,}0 \cdot 10^6$
S k y s t a s i s k u r a s			
Benzinas, nafta	$4{,}6 \cdot 10^7$	Ligroinas	$4{,}33 \cdot 10^7$
Dizelinis kuras	$4{,}2 \cdot 10^7$	Mazutas	$4{,}0 \cdot 10^7$
Etilo spiritas	$2{,}7 \cdot 10^7$	Žibalas	$4{,}31 \cdot 10^7$
D u j i n i s k u r a s (1 m³ normaliosiomis sąlygomis)			
Gamtinės dujos	$3{,}55 \cdot 10^7$	Koksavimo dujos	$1{,}64 \cdot 10^7$
Generatorinės dujos	$5{,}5 \cdot 10^6$	Šviečiamosios dujos	$2{,}1 \cdot 10^7$

IV. Sočiųjų vandens garų slėgis ir tankis įvairiose temperatūrose

t °C	*p* mm Hg	ϱ kg/m³	*t* °C	*p* mm Hg	ϱ kg/m³
−10	1,95	$2{,}14 \cdot 10^{-3}$	17	14,5	$1{,}45 \cdot 10^{-2}$
−5	3,01	$3{,}24 \cdot 10^{-3}$	18	15,5	$1{,}54 \cdot 10^{-2}$
−4	3,28	$3{,}51 \cdot 10^{-3}$	19	16,5	$1{,}63 \cdot 10^{-2}$
−3	3,57	$3{,}81 \cdot 10^{-3}$	20	17,5	$1{,}73 \cdot 10^{-2}$
−2	3,88	$4{,}13 \cdot 10^{-3}$	21	18,7	$1{,}83 \cdot 10^{-2}$
−1	4,22	$4{,}47 \cdot 10^{-3}$	22	19,8	$1{,}94 \cdot 10^{-2}$
0	4,6	$4{,}8 \cdot 10^{-3}$	23	21,1	$2{,}06 \cdot 10^{-2}$
1	4,9	$5{,}2 \cdot 10^{-3}$	24	22,4	$2{,}18 \cdot 10^{-2}$
2	5,3	$5{,}6 \cdot 10^{-3}$	25	23,8	$2{,}30 \cdot 10^{-2}$
3	5,7	$6{,}0 \cdot 10^{-3}$	26	25,2	$2{,}44 \cdot 10^{-2}$
4	6,1	$6{,}4 \cdot 10^{-3}$	27	26,7	$2{,}58 \cdot 10^{-2}$
5	6,6	$6{,}8 \cdot 10^{-3}$	28	28,4	$2{,}72 \cdot 10^{-2}$
6	7,0	$7{,}3 \cdot 10^{-3}$	29	30,0	$2{,}87 \cdot 10^{-2}$
7	7,5	$7{,}8 \cdot 10^{-3}$	30	31,8	$3{,}03 \cdot 10^{-2}$
8	8,0	$8{,}3 \cdot 10^{-3}$	40	55,3	$5{,}12 \cdot 10^{-2}$
9	8,6	$8{,}8 \cdot 10^{-3}$	50	92,5	$8{,}30 \cdot 10^{-2}$
10	9,2	$9{,}4 \cdot 10^{-3}$	60	149,4	$1{,}30 \cdot 10^{-1}$
11	9,8	$1{,}00 \cdot 10^{-2}$	80	355,1	$2{,}93 \cdot 10^{-1}$
12	10,5	$1{,}07 \cdot 10^{-2}$	100	760,0	$5{,}98 \cdot 10^{-1}$
13	11,2	$1{,}14 \cdot 10^{-2}$	120	1489,0	1,123
14	12,0	$1{,}21 \cdot 10^{-2}$	160	4636	3,259
15	12,8	$1{,}28 \cdot 10^{-2}$	200	11661	7,763
16	13,6	$1{,}36 \cdot 10^{-2}$			

V. Psichrometrinė lentelė

Sauso termometro rodoma temperatūra		Sauso ir šlapio termometrų parodymų skirtumas K											
K	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
273	0	100	82	63	45	28	11						
	1	100	83	65	48	32	16						
	2	100	84	68	51	35	20						
	3	100	84	69	54	39	24	10					
	4	100	85	70	56	42	28	14					
278	5	100	86	72	58	45	32	19	6				
	6	100	86	73	60	47	35	23	10				
	7	100	87	74	61	49	37	26	14				
	8	100	87	75	63	51	40	28	18	7			
	9	100	88	76	64	53	42	31	21	11			
283	10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4		
	11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8		
	12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11		
	13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
	14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9	
288	15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	5
	16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15	8
	17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	10
	18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20	13
	19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	15
293	20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	18
	21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	20
	22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22
	23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	24
	24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26
298	25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	27

VI. Virimo taškai ir specifinės garavimo šilumos (virimo taške)

Medžiaga	T_v K	t_v °C	r J/kg
Acetonas	329,2	56,2	$5{,}2 \cdot 10^5$
Amoniakas	239,6	—33,4	$1{,}37 \cdot 10^6$
Benzinas	423	150	$3{,}0 \cdot 10^5$
Etilo eteris	308	35	$3{,}52 \cdot 10^5$
Etilo spiritas	351	78	$8{,}57 \cdot 10^5$
Freonas-12	243,2	—29,8	$1{,}68 \cdot 10^6$
Geležis	3323	3050	$5{,}8 \cdot 10^4$
Gyvsidabris	630	357	$2{,}85 \cdot 10^5$
Oras	81	—192	$2{,}1 \cdot 10^5$
Terpentinas	433	160	$2{,}94 \cdot 10^5$
Vanduo	373	100	$2{,}26 \cdot 10^6$
Vanduo sunkusis	374,43	101,43	$2{,}06 \cdot 10^6$

VII. Kai kurių medžiagų krizinės temperatūros ir slėgiai

Medžiaga	T_{kr} K	t_{kr} °C	p_{kr}	
			Pa	atm
Angliarūgštės dujos	304	31	$7{,}39 \cdot 10^6$	73
Azotas	156	—117	$3{,}39 \cdot 10^6$	33,5
Deguonis	155	—118	$5{,}08 \cdot 10^6$	50,1
Etilo spiritas	516,1	243,1	$6{,}4 \cdot 10^6$	63
Vandenilis	32	—241	$1{,}3 \cdot 10^6$	12,8
Vanduo	647	374	$22{,}12 \cdot 10^6$	218,5

VIII. Paviršiaus įtempimo koeficientai (293 K temperatūroje)

Medžiaga	σ N/m	Medžiaga	σ N/m
Acetonas	0,024	Terpentinas	0,027
Benzinas	0,029	Vanduo	0,072
Etilo spiritas	0,022	Vario sulfato tirpalas	0,074
Gyvsidabris	0,470	Žibalas	0,024
Muilo tirpalas	0,040		
Ricinos aliejus	0,033		

IX. Kai kurių medžiagų tamprumo moduliai

Medžiaga	E Pa	Medžiaga	E Pa
Aliuminis	$7 \cdot 10^{10}$	Plyta	$2{,}8 \cdot 10^{10}$
Betonas	$2 \cdot 10^{10}$	Švinas	$1{,}7 \cdot 10^{10}$
Geležis	$2 \cdot 10^{11}$	Varis	$1{,}2 \cdot 10^{11}$
Ketus	$9 \cdot 10^{10}$	Žalvaris	$1{,}1 \cdot 10^{11}$
Plienas	$2{,}2 \cdot 10^{11}$		

X. Kietųjų kūnų ilgėjimo koeficientai

Medžiaga	α K^{-1}	Medžiaga	α K^{-1}
Aliuminis, diuralis	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	Invaras	$6 \cdot 10^{-7}$
Auksas	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$	Ketus	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
Betonas, cementas	$(10—14) \cdot 10^{-6}$	Platina	$9 \cdot 10^{-6}$
Bronza	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$	Stiklas	$9 \cdot 10^{-6}$
Ebonitas	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$	Švinas	$2{,}9 \cdot 10^{-5}$
Geležis, plienas	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	Varis	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$
		Volframas	$4 \cdot 10^{-6}$
		Žalvaris	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$

XI. Skysčių tūrinio plėtimosi koeficientai

Medžiaga	β K^{-1}
Benzinas	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$
Etilo spiritas	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$
Gyvsidabris	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$
Glicerinas	$5{,}0 \cdot 10^{-4}$

Tęsinys

Medžiaga	β K^{-1}
Sieros rūgštis	$5{,}7 \cdot 10^{-4}$
Transformatorinė alyva	$6{,}0 \cdot 10^{-4}$
Vanduo 5—10 °C	$5{,}3 \cdot 10^{-5}$
10—20 °C	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$
20—40 °C	$3{,}02 \cdot 10^{-4}$
40—60 °C	$4{,}58 \cdot 10^{-4}$
60—80 °C	$5{,}87 \cdot 10^{-4}$
80—100 °C	$7{,}02 \cdot 10^{-4}$

XII. Kietųjų kūnų lydymosi taškai ir specifinės lydymosi šilumos (lydymosi taškuose)

Medžiaga	T_{lyd} K	λ J/kg
Alavas	505	$5{,}8 \cdot 10^{4}$
Aliuminis	932	$3{,}8 \cdot 10^{5}$
Auksas	1337	$6{,}6 \cdot 10^{4}$
Cinkas	692	$1{,}18 \cdot 10^{5}$
Geležis	1803	$2{,}7 \cdot 10^{5}$
Gyvsidabris	234	$1{,}25 \cdot 10^{4}$
Ketus pilkasis	1423	$9{,}7 \cdot 10^{4}$
Plienas	1673	$2{,}1 \cdot 10^{5}$
Sidabras	1233	$8{,}8 \cdot 10^{4}$
Švinas	600	$2{,}5 \cdot 10^{4}$
Vanduo, ledas	273	$3{,}35 \cdot 10^{5}$
Varis	1356	$1{,}8 \cdot 10^{5}$
Volframas	3683	$2{,}6 \cdot 10^{4}$

XIII. Dielektrinės skvarbos

Medžiaga	ε	Medžiaga	ε
Benzinas	2,3	Porcelianas	4—7
Ebonitas	2,7	Stiklas	5—10
Gintaras	2,8	Transformatorinė alyva	2,2—2,5
Glicerinas	39	Vakuumas	1
Guma	2—3	Vanduo 20 °C	81
Ledas (—18 °C)	3,2	0 °C	88
Oras 1 atm	1,0006	Vaškas	5,8
100 atm	1,055	Žėrutis	6—9
Parafinuotas popierius	2,0	Žibalas	2,0

XIV. Specifinės varžos

Medžiaga	ϱ Ω·m
Aliuminis	$2,7 \cdot 10^{-8}$
Anglis	$(4,0—5,0) \cdot 10^{-5}$
Auksas	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Fechralis	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Geležis	$9,9 \cdot 10^{-8}$
Gyvsidabris	$9,54 \cdot 10^{-7}$
Konstantanas	$4,7 \cdot 10^{-7}$
Manganinas	$3,9 \cdot 10^{-7}$
Nichromas	$1,05 \cdot 10^{-6}$
Nikelinas	$4,2 \cdot 10^{-7}$
Nikelis	$7,3 \cdot 10^{-8}$
Sidabras	$1,58 \cdot 10^{-8}$
Švinas	$2,07 \cdot 10^{-7}$
Varis	$1,68 \cdot 10^{-8}$
Volframas	$5,3 \cdot 10^{-8}$
Žalvaris	$6,3 \cdot 10^{-8}$

XV. Temperatūriniai varžos koeficientai

Medžiaga	α K^{-1}
Fechralis	0,0002
Konstantanas	0,000005
Manganinas	0,000008
Nichromas	0,0002
Nikelinas	0,0001
Volframas	0,005

XVI. Elektrocheminiai ekvivalentai

Medžiaga	k kg/C	Medžiaga	k kg/C
Aliuminis	$9,32 \cdot 10^{-8}$	Magnis	$1,26 \cdot 10^{-7}$
Auksas	$6,81 \cdot 10^{-7}$	Natris	$2,383 \cdot 10^{-7}$
Chloras	$3,67 \cdot 10^{-7}$	Nikelis	
Cinkas	$3,338 \cdot 10^{-7}$	dvivalentis	$3,04 \cdot 10^{-7}$
Deguonis	$8,29 \cdot 10^{-8}$	trivalentis	$2,03 \cdot 10^{-7}$
Gyvsidabris	$2,072 \cdot 10^{-6}$	Sidabras	$1,118 \cdot 10^{-6}$
Kalcis	$2,077 \cdot 10^{-7}$	Švinas	$1,074 \cdot 10^{-5}$
Kalis	$4,052 \cdot 10^{-7}$	Vandenilis	$1,044 \cdot 10^{-8}$
		Varis	$3,294 \cdot 10^{-7}$

XVII. Magnetinės skvarbos

Medžiaga	μ	Medžiaga	μ
Permalojus	250 000	Kobaltas	175
Geležis (minkšta)	8 000	Oras	1,00000038
Nikelis	1 100	Vakuumas	1
Ketus	700	Varis	0,999995

XVIII. Lūžio rodikliai

Medžiaga	n	Medžiaga	n
Deimantas	2,42	Oras	1,0003
Etilo spiritas	1,36	Stiklas (lengvasis kronas)	1,50
Glicerinas	1,47	Terpentinas	1,51
Kvarcas	1,54	Vanduo	1,33
Ledas	1,31		

UŽDAVINIŲ ATSAKYMAI

2.1. 2,8 kN. **2.2.** 2,0 m/s^2. **2.3.** 2,5 kW. **2.4.** $4{,}9 \times 10^{-3}$.

4.2. 565 m/s. **4.3.** 1300 m/s; 392 m/s; $5{,}6 \times 10^{-21}$ J.

5.1. $3{,}2 \cdot 10^5$ Pa. **5.2.** 1,2 m^3. **5.3.** 15 l. **5.4.** $6{,}1 \times 10^5$ Pa.

6.1. 1,2 m^3. **6.2.** 633 K. **6.3.** $1{,}2 \cdot 10^5$ Pa. **6.4.** $3{,}92 \cdot 10^6$ Pa.

7.1. 355 m/s. **7.2.** $4{,}7 \cdot 10^4$ Pa; 19,5 g. **7.3.** 240 K. **7.4.** $2{,}94 \cdot 10^5$ Pa.

8.2. 168 g. **8.3.** 303 K.

9.1. 1,7 K. **9.2.** 4,0 l. **9.3.** 8,5 K. **9.4.** 16 min.

10.1. 120 km. **10.2.** 60 W.

11.2. 2,5 g. **11.3.** 10,7 g/m^3; 62 %. **11.4.** 70 %.

12.1. 35 g. **12.2.** 87 °C.

13.1. Skystis, dujos, skystis. **13.2.** 2400 Pa; nesotinantieji garai. **13.3.** Taip, ne, taip.

14.1. 0,072 N/m. **14.2.** 7 g.

15.1. 15 cm; 6,3 cm; 7 cm. **15.2.** 12 cm; 4,9 cm; 5,6 cm; 0,074 N/m.

17.1. $2{,}3 \cdot 10^{-2}$ m. **17.2.** 2,45. **17.3.** $F \geqslant 2{,}2 \times 10^2$ N; $\varepsilon = 9{,}8 \cdot 10^{-4}$. **17.4.** $2{,}84 \cdot 10^{-4}$ m.

18.1. 7740 kg/m^3; 7820 kg/m^3. **18.2.** 241 °C. **18.3.** 5 cm.

19.2. 0,57 kg. **19.3.** 930 kg.

20.1. $2{,}3 \cdot 10^{-3}$ N; $5 \cdot 10^{-8}$ C. **20.2.** 1×10^{-5} C; $3 \cdot 10^{-5}$ C; 0,03 m. **20.3.** $6{,}0 \cdot 10^{-3}$ kg.

21.1. $7{,}5 \cdot 10^4$ N/C. **21.2.** 3300 N/C. **21.3.** 0: $2q/4\pi\varepsilon a^2$. **21.4.** $1 \cdot 10^{-7}$ s. **21.5.** Vanduo; $0{,}72 \times 10^{-9}$ $C^2/N \cdot m^2$. **21.6.** $9{,}2 \cdot 10^5$ N/C.

22.1. $11{,}2 \cdot 10^{-9}$ J; 3 eV. **22.4.** $9{,}2 \cdot 10^{-3}$ J. **22.5.** 0,15 m. **22.6.** 0,27 J. **23.1.** 400 V.

23.3. 52 V.

24.1. $7{,}1 \cdot 10^{-4}$ F. **24.2.** $4 \cdot 10^4$ V; $4 \cdot 10^{-2}$ m. **24.3.** 0,04 μF. **24.4.** 0,8 μF; 44 V; 176 V. **24.5.** $0{,}12 \times 10^{-7}$ F. **24.6.** $12 \cdot 10^{-7}$ C.

25.1. $0{,}125 \cdot 10^{-3}$ m/s. **25.2.** $2 \cdot 10^6$ A/m. **25.3.** 0,52 mm. **25.4.** 750 kg. **25.5.** 2,2 kN. **25.6.** 50 m.

26.1. 1,2 A. **26.2.** $-0{,}0002$ $°C^{-1}$. **26.3.** 46 Ω. **26.4.** 470,2 Ω.

27.1. 44 Ω; 5 A; 50 V; 90 V; 220 V. **27.2.** 120 Ω; lygiagrečiai. **27.3.** 0,55 A. **27.4.** 18 Ω; 9 Ω. **27.5.** 10 V; 5 Ω.

28.1. 270 MJ. **28.2.** 7200 J. **28.3.** **28.4.** 12 m/s. **28.5.** 380 A. **28.6.** 4,3 K.

29.1. 22,6 Ω; 5,3 A. **29.2.** 533 kJ; 4,6 Ω; 11 m.

30.1. Dvivalentis nikelis. **30.2.** $3{,}33 \cdot 10^{-7}$ kg/C; 1 %. **30.3.** 5 A; 6 V; 60 W · h.

31.1. $3{,}56 \cdot 10^{-15}$ N. **31.2.** $3{,}5 \cdot 10^4$ V/m.

32.4. 300 V.

33.1. 25 kartus.

35.2. $5{,}2 \cdot 10^3$ A/m. **35.3.** $1{,}3 \cdot 10^2$ A/m. **35.4.** 55 A/m; 5 A/m.

36.2. 23 A/m; $2{,}9 \cdot 10^{-5}$ T. **36.3.** $4{,}9 \cdot 10^3$ A/m; $6{,}2 \cdot 10^{-3}$ T. **36.4.** 0,74 A.

37.1. 19 N. **37.3.** 58 A. **37.4.** $3{,}0 \cdot 10^{-2}$ m. **37.5.** 2,5 J. **37.6.** $8{,}8 \cdot 10^{-6}$ Wb.

38.1. $6{,}3 \cdot 10^{-13}$ N; 3,1 mm. **38.2.** $3{,}5 \cdot 10^6$ m/s. **38.3.** 7,6 cm; 2,5 m.

39.1. 29 cm. **39.2.** $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ T. **39.3.** 13 V. **39.4.** 3,5 mV. **39.5.** 100 vijų. **39.6.** 23°30′.

40.1. 22 V. **40.2.** 20 vijų. **40.3.** 2,0 A. **40.4.** 0,56 J; 14 V. **40.5.** 91 ms. **40.6.** $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ T.

41.1. 1,5 V. **41.3.** 85 V; 0,01 s. **41.4.** 6 A; 0,651 rad; 50 Hz; 5,1 A; 8,1 A. **41.5.** 0,25 rad.; -46 V; $-8{,}8$ A.

42.1. 13,2 Ω; 52,8 Ω; 106 Ω. **42.2.** 12,7 Ω; 3,2 Ω; 1,6 Ω. **42.3.** 15 V. **42.4.** 82 W; 6,4 A.

43.2. 0,11 Ω; 7,6 A.

44.2. 1550 Hz. **44.3.** 200 m. **44.4.** 25,4 pF. **44.5.** 10,5 m. **44.6.** Nuo 630 m iki 1900 m.

48.1. Nuo 400 iki 750 nm; $2{,}3 \cdot 10^{-19}$ J. **48.2.** Fazės vienodos. **48.3.** 8 min 20 s. **48.4.** $2{,}76 \cdot 10^{-19}$ J. **48.5.** $26 \cdot 10^{-14}$.

49.1. 25 cm. **49.2.** 0,48 m^2. **49.3.** 16 lm. **49.4.** 10 lm/W. **49.5.** $15 \cdot 10^3$ lm. **49.6.** 755 lx. **49.7.** 173 cd; 2180 lm. **49.8.** 124 cd.

50.1. 67 lx. **50.2.** 1,73 karto. **50.4.** 53 lx; 34 lx. **50.5.** 7,2 lx. **50.6.** 25 lx.

51.3. 0,06 mm. **51.4.** $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ rad. **51.5.** 9,7. **51.6.** 0,12 μm.

52.1. 0,002 mm. **52.2.** 0,005 mm. **52.3.** 13 cm. **52.4.** 53°.

53.1. $2{,}26 \cdot 10^8$ m/s; $2{,}24 \cdot 10^8$ m/s. **53.2.** 1,51; 1,53. **55.1.** Ne; 316 nm.

55.2. 5900 kartų.

56.1. 260 mm. **56.2.** Ne. **56.3.** $2{,}13 \cdot 10^{-19}$ J. **56.4.** 223 nm.

59.1. $2{,}47 \cdot 10^{-15}$ Hz. **59.2.** 91 nm. **59.3.** $-2{,}41 \cdot 10^{-19}$ J. **59.4.** 485 nm; žalsvai žydra.

61.1. 8 h; 10 h. **61.2.** 0,8 m. **61.3.** 0,36*c*; 0,99*c*.

62.1. 1,34 kg. **62.2.** $3{,}64 \cdot 10^{-22}$ kg · m/s. **62.3.** 10^{-7} kg. **62.4.** 0,8*c*.

63.1. 10,7 Rd. **63.2.** 61 Rd. **63.3.** 5 min 5 s. **63.4.** 17,5 %; 1,5 m.

64.1. $^{234}_{92}U$. **64.3.** $^{206}_{82}Pb$. **64.4.** $^{215}_{81}Po$.

DALYKINĖ IR VARDINĖ RODYKLĖ

TURINYS

Vytautas **Tarasonis**

FIZIKA

Vadovėlis XI—XII klasei

Redaktorė E. Juškienė
Fizikų portretus piešė dailininkas S. Ikamas
Viršelio dailininkas J. Gudmonas
Meninis redaktorius V. Ajauskas
Techninė redaktorė L. Žvinakevičienė
Korektorės: N. Kolpigina, A. Sidarkevičienė

SL 256. 1995 02 27. Formatas 70×90 1/16.
24,33 apsk. leid. l. Tiražas 5000 egz. Užsakymas 532.
Mokslo ir enciklopedijų leidykla, Žvaigždžių 23, 2050 Vilnius
Spausdino „Spindulio“ spaustuvė, Gedimino 10, 3000 Kaunas
Sutartinė kaina